

Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales

etsii UPCT

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO TERMOHIDRÁULICO EN TUBOS DE COLECTORES SOLARES PLANOS CON LÁMINAS EN ESPIRAL.

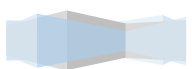
Titulación: Ingeniería Industrial

Alumno/a: Iñigo Fandiño de Andrés

Director/a/s: Alberto García Pinar

Juan F. Cerón Muñoz

Cartagena, 15 de Septiembre de 2014



INDICE GENERAL:

INDICE FIGURAS:	7
INDICE DE TABLAS:	11
LISTA DE SIMBOLOS	13
1 INTRODUCCION.	17
1.1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.	21
1.1.1 ANTECEDENTES.	21
1.1.2 OBJETIVOS.	22
1.2 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.	25
1.2.1 CAPTACIÓN ENERGÉTICA.	26
1.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	29
1.3.1 CONVECCION.	29
1.3.1.1 CONVECCIÓN FORZADA EN TUBOS Y CONDUCTOS.	30
1.3.1.2 CONVECCIÓN MIXTA.	46
1.3.2 COLECTORES SOLARES.	51
1.3.2.1 COMPONENTES DE UN COLECTOR SOLAR PLANO.	52
1.3.2.2 CONEXIÓN DE CAPTADORES.	56
1.3.2.3 ASPECTOS IMPORTANTES EN UN COLECTOR SOLAR.	61
1.3.2.4 ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN DE LOS COLECTORES.	63
1.3.3 MODELO MATEMÁTICO DE UN COLECTOR SOLAR PLANO.	64
1.3.3.1 BALANCE DE POTENCIA.	64
1.3.3.2 EFICIENCIA TÉRMICA.	65
1.3.3.3 RENDIMIENTO.	66
1.3.3.4 DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL COLECTOR.	67
1.3.3.5 PRODUCTO TRANSMITANCIA-ABSORTANCIA.	68
1.3.3.6 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS DE CALOR DEL COLECTOR.	68
1.3.3.7 FACTOR DE EFICIENCIA DE LAS ALETAS Y DEL COLECTOR.	70
1.3.3.8 FACTOR DE REMOCIÓN DEL CALOR.	71
1.3.3.9 CORRELACIONES: TRANSFERENCIA DE CALOR EN TUBO.	73
1.4 TRANSFERENCIA DEL CALOR MEJORADA.	75
1.4.1 ELEMENTOS INSERTADOS.	78
2 INSTRUMENTACIÓN Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.	83
2.1 INSTRUMENTACIÓN.	83
2.1.1 CIRCUITO PRINCIPAL. (CP).	84
2.1.2 CIRCUITO SECUNDARIO. (CS).	85
2.1.3 INSTALACIÓN HIDRÁULICA.	85
2.1.4 INTERCAMBIADOR DE CALOR.	86
2.1.5 DEPÓSITO.	88
2.1.6 MÁQUINA FRIGORÍFICA.	89

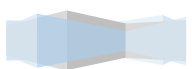


2.1.7	BOMBA HIDRÁULICA.	91
2.1.8	VÁLVULAS AUTOMÁTICAS.	92
2.1.9	PANELES SOLARES.	94
2.1.10	TUBOS/TUBERÍAS.	96
2.1.11	FLUIDOS ENSAYADOS.	97
2.1.12	MANTAS TÉRMICAS.	101
2.1.13	RESISTENCIAS TÉRMICAS DE INMERSIÓN.	103
2.1.14	AUTOTRANSFORMADOR.	108
2.1.15	CAUDALÍMETRO DE EFECTO CORIOLIS.	109
2.1.16	VARIADOR DE FRECUENCIA.	110
2.1.17	TERMOPARES.	111
2.1.18	DISPOSITIVO TÉRMICO RESISTIVO: RTD'S.	114
2.1.19	DIFERENCIALES DE PRESIÓN.	115
2.1.20	CAUDALÍMETROS DE TURBINA.	119
2.1.21	VÁLVULAS DE MICRORREGULACIÓN.	120
2.1.22	SONDA DE TEMPERATURA AMBIENTE.	121
2.1.23	CONTROLADOR PID.	122
2.2	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.	124
2.2.1	AGILENT.	124
2.2.2	MEDIDAS DE INTENSIDAD: TRANSDUCTOR DE INTENSIDAD.	125
2.2.3	TARJETA DE RELÉS.	126
2.3	PROTOCOLO DE ENSAYO.	127
2.3.1	SELECCIÓN DEL MODO DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA.	127
2.3.2	PUESTA A PUNTO PARA LA TOMA DE DATOS.	129
2.3.3	POTENCIA Y CAUDAL. APLICACIÓN WEB DEL AGILENT (IP).	130
2.3.4	PRESURIZADO, DESPRESURIZADO Y PURGADO DEL CIRCUITO.	149
2.3.5	PROCEDIMIENTO DE CAMBIO DE FLUIDO.	150
3	ENSAYOS Y RESULTADOS.	153
3.1	CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DEL NÚMERO DE NUSSELT DEBIDA A LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA.	153
3.2	ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR A LO LARGO DEL TUBO.	155
3.3	ENSAYOS DE FRICCIÓN.	157
3.3.1	ENSAYOS DE FRICCIÓN. DISCUSIÓN.	161
3.4	ENSAYOS DE CALOR.	164
3.4.1	ENSAYO DE CALOR TUBO LISO.	164
3.4.2	ENSAYOS TT 42.	172
3.4.3	ENSAYOS TT 84. (VER ANEXO III)	180
3.4.4	ENSAYOS TT 126. (VER ANEXO III)	181
3.4.5	ENSAYOS TT. COMPARATIVA GLOBAL.	182
3.4.6	ENSAYOS MUELLE WC 01.	183



3.4.7	ENSAYOS MUELLE WC 02. (VER ANEXO IV)	190
3.4.8	ENSAYOS MUELLE WC 03. (VER ANEXO IV)	191
3.4.9	ENSAYOS MUELLES. COMPARATIVA GLOBAL.....	192
3.5	COMPARATIVA: NÚMERO DE NUSSELT. TODOS LOS DISPOSITIVOS.....	193
4	CONCLUSIONES.	198
4.1	CONCLUSIONES DEL PROYECTO.	198
4.2	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	200
4.3	POSIBLES MEJORAS DE LA INSTALACIÓN.....	200
	ANEXOS	201
	ANEXO I: HOJAS DE DATOS DE LOS ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN	203
	ANEXO II: CANALES DE BENCHLINK DATA LOGGER.	243
	ANEXO III: ENSAYOS DE CALOR CON LÁMINAS INSERTADAS.	245
	ANEXO III: ENSAYOS TT 84.	245
	ANEXO III: ENSAYOS TT 126.	253
	ANEXO IV: ENSAYOS DE CALOR CON MUELLES RÍGIDOS.	261
	ANEXO IV: ENSAYOS WC02.	261
	ANEXO IV: ENSAYOS WC03.	268
	ANEXO V: PROGRAMA UTILIZADO PARA EL PROCESADO DE DATOS.	277
	ANEXO V: TUBO LISO.....	277
	ANEXO IV: LÁMINAS TT.....	284
	ANEXO IV: MUELLE.....	291
	BIBLIOGRAFIA	297





INDICE FIGURAS:

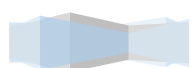
FIGURA 1 : DIÁMETRO HIDRÁULICO DE: A) UNA SECCIÓN TRANSVERSAL IRREGULAR Y B) UNA REGIÓN ANULAR.	31
FIGURA 2: ESTRUCTURA DE FLUJO PARA UN FLUIDO EN FLUJO TURBULENTO A TRAVÉS DE UN TUBO.	33
FIGURA 3:	35
FIGURA 4: DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD Y VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	35
FIGURA 5: BALANCE DE FUERZAS EN UN ELEMENTO FLUIDO DENTRO DE UN TUBO DE RADIO r_s	37
FIGURA 6: VARIACIÓN DE T_b CON FLUJO DE CALOR UNIFORME (A) Y CON T_s CONSTANTE (B).	39
FIGURA 7: VOLUMEN DE CONTROL PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO EN FLUJO DE UN TUBO.	39
FIGURA 8: PERFILES DE FLUJO EN CONVECCIÓN MIXTA.	46
FIGURA 9 : CONVECCIÓN FORZADA, NATURAL Y MIXTA PARA FLUJO EN TUBOS HORIZONTALES (A) Y VERTICALES (B).	50
FIGURA 10: ESQUEMA BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DE UN COLECTOR SOLAR PLANO.	51
FIGURA 11: PARTES DE UN COLECTOR SOLAR PLANO.	52
FIGURA 12: CONEXIÓN EN SERIE DE CAPTADORES.	57
FIGURA 13: CONEXIÓN EN PARALELO CON CAPTADORES DE 2 VÍAS.	58
FIGURA 14: CONEXIÓN EN PARALELO CON CAPTADORES DE 4 VÍAS.	59
FIGURA 15: CAMPO DE CAPTADORES CON RETORNO INVERTIDO.	60
FIGURA 16: CAMPO DE CAPTADORES CON VÁLVULAS DE EQUILIBRADO.	60
FIGURA 17: ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN DE UN COLECTOR SEGÚN LA ÉPOCA DEL AÑO.....	63
FIGURA 18: ESQUEMA DE UN COLECTOR SOLAR PLANO.	67
FIGURA 19: DISTRIBUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS EN UN ABSORBEDOR PLANO.	68
FIGURA 20: ESQUEMA DE PÉRDIDAS DE CALOR EN UN COLECTOR SOLAR.....	69
FIGURA 21: GEOMETRÍA DEL TUBO Y LA ALETA DE UN ABSORBEDOR.	69
FIGURA 22: EJEMPLO DE TRES TIPOS DE DISPOSITIVOS INSERTADOS.	77
FIGURA 23: DISPOSITIVOS INSERTADOS PARA TUBO LISO.	78
FIGURA 24: ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN DE ENSAYO	83
FIGURA 25: INSTALACIÓN DEL CIRCUITO PRINCIPAL.	84
FIGURA 26: INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PLACAS 2C2 CIPRIANI.	87
FIGURA 27: ESQUEMA INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PLACAS QUE INDICA LA DIRECCIÓN DEL FLUJO CALIENTE Y FRÍO .	87
FIGURA 28: DEPÓSITO TRE-30C SUPRA DE EDESA.	88
FIGURA 29: MÁQUINA FRIGORÍFICA HRS050-W DE SMC.....	89
FIGURA 30: BOMBA TPE DE GRUNDFOS.	91
FIGURA 31: VÁLVULA AUTOMÁTICA AVM105SF132 DE SAUTER.....	92
FIGURA 32: CAPTADOR SOLAR DE ENSAYO TÉRMICAMENTE AISLADO.	94
FIGURA 33: DISPOSICIÓN DEL ARMAFLEX A LO LARGO DEL CAPTADOR.	95
FIGURA 34: DETALLE DE LA DISPOSICIÓN DE LAS LUTERMAS Y EL ARMAFLEX.....	95
FIGURA 35: CONMUTACIÓN DE CRUCE POR CERO.....	106
FIGURA 36: CARCASA Y ESTRUCTURA EXTERNA DEL AUTOTRANSFORMADOR TORIVAC.	108
FIGURA 37: ESQUEMA DEL CAUDALÍMETRO EFECTO CORIOLIS.	109
FIGURA 38: VARIADOR DE FRECUENCIA OMRON A4004 JX.....	110
FIGURA 39: DETALLE DE CÓMO ESTÁN POSICIONADOS LOS TERMOPARES EN CADA SECCIÓN DE MEDIDA.	111
FIGURA 40: ESQUEMA DE LAS SECCIONES DONDE ESTÁN POSICIONADOS LOS TERMOPARES EN EL COLECTOR.	112
FIGURA 41: POSICIÓN DE LOS TERMOPARES EN LA SECCIÓN J.....	112
FIGURA 42: TERMOPARES TIPO T POSICIONADOS SOBRE EL COLECTOR DE LA INSTALACIÓN.....	113
FIGURA 43: CONEXIÓN INTERNA ELECTRÓNICA RTD.	114
FIGURA 44: DISPOSITIVO RTD.	114
FIGURA 45: DIFERENCIAL DE PRESIÓN.....	115
FIGURA 46: CONEXIÓN ELÉCTRICA.	117
FIGURA 47: DISPLAY.	118
FIGURA 48: CAUDALÍMETROS DE TURBINA GEMS FT-210.	119
FIGURA 49: VÁLVULAS DE MICRORREGULACIÓN HOKE2300.....	120
FIGURA 50: PID WATLOW PM8 EZ-ZONE.....	123
FIGURA 51: VISTA DELANTERA Y TRASERA DE AGILENT 34980 ^a	124
FIGURA 52: TRANSDUCTOR DE INTENSIDAD MACX MCR-SL-CAC-5-I(-UP)	125
FIGURA 53: TARJETA DE RELÉS PARA CONTROL DE LA ENFRIADORA.	126
FIGURA 54: VARIADOR DE FRECUENCIA A TRAVÉS DEL CUAL SE CAMBIA EL MODO DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA.	127
FIGURA 55: TECLAS DE OPERACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.	128



FIGURA 56: PÁGINA DE INICIO DE LA APLICACIÓN WEB DE AGILENT TECHNOLOGIES (IP).....	130
FIGURA 57: SELECCIÓN DE LA OPCIÓN ALLOW FULL CONTROL	131
FIGURA 58: AL SELECCIONAR LA TARJETA CON LA QUE SE QUIERE TRABAJAR.	132
FIGURA 59: PARA ACTIVAR EL CANAL.....	132
FIGURA 60: PESTAÑA DE CONFIGURE CHANNEL PARA INTRODUCIR LOS VOLTIOS	133
FIGURA 61: PESTAÑA CONFIGURE CHANNEL DEL CANAL 5004 QUE CONTIENE LA POTENCIA DE LA MANTA.	133
FIGURA 62: INICIO DEL PROGRAMA BENCHLINK DATA LOGGER.	136
FIGURA 63: LOCALIZACIÓN DEL SOFTWARE AGILENT DENTRO DEL PROGRAMA BENCHLINK DATA LOGGER.....	136
FIGURA 64: ABRIR UN NUEVO ARCHIVO DE DATOS A TRAVÉS DE LA PESTAÑA CONFIGURATION.....	137
FIGURA 65: SELECCIÓN DEL ÚLTIMO ARCHIVO DE DATOS UTILIZADO.	137
FIGURA 66: ASPECTO DEL ARCHIVO DE DATOS SELECCIONADO.....	138
FIGURA 67: APARIENCIA DE LA PESTAÑA <i>SCAN AND LOGData</i> UNA VEZ INICIADA LA TOMA DE MEDIDAS.....	139
FIGURA 68: APARIENCIA DE LA PESTAÑA <i>QUICK GRAPH</i>	140
FIGURA 69: OPCIÓN <i>CHANNELS</i> PARA SELECCIONAR LOS CANALES.....	140
FIGURA 70: PESTAÑA <i>MONITOR CHANNEL PROPERTIES</i> PARA VISUALIZAR UN CANAL EN EL MONITOR.....	141
FIGURA 71: VENTANAS <i>EXPORT DATA</i> Y <i>EXPORT TO FILE</i>	142
FIGURA 72: LISTADO DE LOS ELEMENTOS MANEJADOS CON <i>EZ-ZONE</i>	143
FIGURA 73: INICIO DEL PROGRAMA <i>EZ-ZONE</i> OPERANDO CON EL <i>PID</i> SELECCIONADO.....	143
FIGURA 74: RAMAS DEL MENÚ <i>OPERATIONS</i>	144
FIGURA 75: VARIABLES DEL MENÚ <i>CONTROL LOOP</i>	145
FIGURA 76: OPCIÓN <i>AUTOTUNE</i> DENTRO DEL MENÚ <i>CONTROL LOOP</i>	145
FIGURA 77: PARÁMETROS DENTRO DEL MENÚ <i>MONITOR</i>	146
FIGURA 78: SELECCIÓN DEL TIPO DE TARJETA DE RELÉS QUE CONTROLAN LA MÁQUINA FRIGORÍFICA.....	147
FIGURA 79: VENTANA PRINCIPAL DEL SOFTWARE <i>DENKOVI RELAY MANAGER</i>	147
FIGURA 80: ACTIVACIÓN DEL RELÉ NÚMERO 1 A TRAVÉS DEL CUAL SE ENCIENDE LA MÁQUINA FRIGORÍFICA	148
FIGURA 81: OPCIÓN <i>CLOSE</i> EN <i>DEVICE SETTINGS</i>	148
FIGURA 82 : ESQUEMA DEL CAPTADOR SOLAR CON LAS SECCIONES LONGITUDINALES.....	155
FIGURA 83: MEDIDAS GEOMÉTRICAS DE UN MUELLE.	155
FIGURA 84: FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING Vs. REYNOLDS. ΔP Vs. REYNOLDS.	157
FIGURA 85: FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING Vs. REYNOLDS. ΔP Vs. REYNOLDS.	157
FIGURA 86: FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING Vs. REYNOLDS. ΔP Vs. REYNOLDS.	158
FIGURA 87: FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING Vs. REYNOLDS. ΔP Vs. REYNOLDS.	158
FIGURA 88: FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING Vs. REYNOLDS. ΔP Vs. REYNOLDS.	159
FIGURA 89: FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING Vs. REYNOLDS. ΔP Vs. REYNOLDS.	159
FIGURA 90: FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING Vs. REYNOLDS.	160
FIGURA 91: FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING Vs. REYNOLDS. LÁMINAS	161
FIGURA 92: AUMENTO FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING Vs. REYNOLDS. LÁMINAS.	161
FIGURA 93: FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING Vs. REYNOLDS. MUELLES.	162
FIGURA 94: AUMENTO FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING Vs. REYNOLDS. MUELLES.....	162
FIGURA 95: FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING Vs. REYNOLDS.	163
FIGURA 96: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	165
FIGURA 97: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	165
FIGURA 98: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	166
FIGURA 99: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. A LO LARGO DEL TUBO.	166
FIGURA 100: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	167
FIGURA 101: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	167
FIGURA 102: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	168
FIGURA 103: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	168
FIGURA 104: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	169
FIGURA 105: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	169
FIGURA 106: NUSSELT Vs.GASTO MÁSSICO. NUSSELT Vs. Re_{sw}	170
FIGURA 107: NUSSELT Vs.GASTO MÁSSICO. NUSSELT Vs. Re_{sw}	170
FIGURA 108: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	173
FIGURA 109: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	173
FIGURA 110: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	174
FIGURA 111: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	174
FIGURA 112: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	175
FIGURA 113: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	175
FIGURA 114: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	176
FIGURA 115: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	176
FIGURA 116: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	177
FIGURA 117: T^a DE FLUIDO A TRAVÉS DEL TUBO. TEMPERATURA EN LA SECCIÓN J. NUSSELT A LO LARGO DEL TUBO.	177

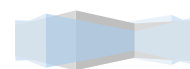


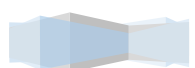
[illegible]



INDICE DE TABLAS:

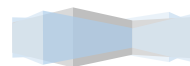
TABLA 1: PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA ENSAYADA.	99
TABLA 2: DATOS TÉCNICOS DE INSTRUMENTACIÓN.	154
TABLA 3: CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS MUELLES UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS.	156
TABLA 4: CARACTERÍSTICA PARA TUBO LISO.	164
TABLA 5: ENSAYOS PARA TUBO LISO.	164
TABLA 6: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 400 W/M ²	171
TABLA 7: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 800 W/M ²	171
TABLA 8: NUSSELT E INCERTIDUMBRE DE NUSSELT.....	171
TABLA 9: CARACTERÍSTICA PARA TT 42.....	172
TABLA 10: ENSAYOS PARA TT 42.	172
TABLA 11: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 400 W/M ²	179
TABLA 12: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 800 W/M ²	179
TABLA 13: NUSSELT E INCERTIDUMBRE DE NUSSELT.....	179
TABLA 14: CARACTERÍSTICA PARA WC 01.	183
TABLA 15: ENSAYOS PARA WC 01.....	183
TABLA 16: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 400 W/M ²	188
TABLA 17: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 800 W/M ²	189
TABLA 18: NUSSELT E INCERTIDUMBRE DE NUSSELT.....	189
TABLA 19: CANALES DATA-LOGGER.	244
TABLA 20: CARACTERÍSTICA PARA TT 84.....	245
TABLA 21: ENSAYOS PARA TT 84.	245
TABLA 22: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 400 W/M ²	252
TABLA 23: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 800 W/M ²	252
TABLA 24: NUSSELT E INCERTIDUMBRE DE NUSSELT.....	252
TABLA 25: CARACTERÍSTICA PARA TT 126.....	253
TABLA 26: ENSAYOS PARA TT 126.	253
TABLA 27: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 400 W/M ²	260
TABLA 28: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 800 W/M ²	260
TABLA 29: NUSSELT E INCERTIDUMBRE DE NUSSELT.....	260
TABLA 30: CARACTERÍSTICA PARA WC 02.	261
TABLA 31: ENSAYOS PARA WC 02.....	261
TABLA 32: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 400 W/M ²	266
TABLA 33: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 800 W/M ²	267
TABLA 34: NUSSELT E INCERTIDUMBRE DE NUSSELT.....	267
TABLA 35: CARACTERÍSTICA PARA WC 03.	268
TABLA 36: ENSAYOS PARA WC 03.....	268
TABLA 37: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 400 W/M ²	274
TABLA 38: NUSSELT VS. LONGITUD DEL TUBO A 800 W/M ²	275
TABLA 39: NUSSELT E INCERTIDUMBRE DE NUSSELT.....	275





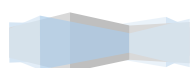
LISTA DE SIMBOLOS

A	Área de intercambio de calor ($= \pi D l_t$)	m^2
CH	Capacitancia del lado H del sensor de presión	$[F]$
CL	Capacitancia del lado L del sensor de presión	$[F]$
c_p	Calor específico	$J/Kg\ K$
d	Diámetro interior del tubo	m
e	Espesor del muelle rígido helicoidal	m
f	Factor de fricción de Fanning	$[-]$
F	Frecuencia	$[Hz]$
h_i	Coefficiente de transferencia de calor interno	$W/m^2\ K$
k	Conductividad térmica del fluido	$W/m\ K$
l	Longitud del tubo	m
\dot{m}	Flujo másico	kg/s
Nu	Número de Nusselt	$[-]$
P	Presión	Pa
p	Paso del muelle rígido helicoidal	m
Pr	Número de Prandtl ($= \mu c_p / k$)	$[-]$
$P1$	Presión aplicada en la cámara H del sensor de presión	$[Pa]$
$P2$	Presión aplicada en la cámara L del sensor de presión	$[Pa]$
q	Calor total transferido	W
Q	Caudal	m^3/s
T	Temperatura	$^{\circ}C$
U	Coefficiente global de transmisión de calor	$W/m^2\ K$
v	Velocidad local del fluido en dirección axial	m/s
V	Tensión eléctrica	V
Y	Valor de twist ratio	m



LETRAS GRIEGAS

β	<i>Coeficiente de dilatación térmica</i>	K^{-1}
Δd	<i>Deflexión de la membrana del sensor de presión</i>	$[m]$
Δp	<i>Pérdida de presión</i>	Pa
ΔT	<i>Diferencia de temperatura</i>	$^{\circ}C$
ΔT_m	<i>Diferencia de temperatura media</i>	$^{\circ}C$
ϵ	<i>Constante dieléctrica del medio entre dos placas del capacitor</i>	$-$
\emptyset	<i>Función genérica</i>	$[-]$
μ	<i>Viscosidad dinámica (molecular)</i>	$Pa\ s$
ν	<i>Viscosidad cinemática ($= \mu/\rho$)</i>	m^2/s
ρ	<i>Densidad del fluido</i>	kg/m^3



1. INTRODUCCIÓN.

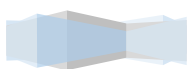
1.1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.

1.2. APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.

1.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

1.4. TRANSFERENCIA DE CALOR MEJORADA.





1 INTRODUCCION.

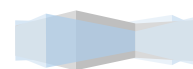
El modelo energético es uno de los retos más importantes que deberá afrontar la humanidad en las próximas décadas; el modelo de desarrollo económico que predomina en la actualidad, de crecimiento continuo y basado en el uso intensivo de recursos energéticos de origen fósil, no puede mantenerse indefinidamente. El agotamiento progresivo de los combustibles fósiles y el impacto medioambiental que provocan, obligan a emprender un cambio de modelo económico basado en el desarrollo sostenible que trate de garantizar el crecimiento económico, el progreso social y el uso racional de los recursos.

Entre las políticas que pueden articularse para asegurar la sostenibilidad del modelo energético, la política de fomento de las energías renovables se encuentra entre las principales. Esta necesidad de fomentar el uso de las energías alternativas tiene dos objetivos definidos:

- La necesidad de responder a los problemas ecológicos que amenazan a nuestro entorno.
- Evitar la dependencia de suministros energéticos de terceros países, que en el caso de España toma especial relevancia.

Por otra parte, el uso creciente de energías renovables en las ciudades también mejora la calidad de vida por reducción de las emisiones derivadas de la combustión de fuentes fósiles. Especialmente, debido a la utilización de colectores solares térmicos en los edificios o de biocarburantes en el sector del transporte. El aumento de ozono troposférico es factor desencadenante de graves enfermedades respiratorias en los grandes núcleos de población, por lo que la mejora de la calidad del aire contribuye al incremento del bienestar social.

Por último, y no por ello menos importante, las energías renovables contribuyen a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y, por lo tanto, la reducción de los daños derivados del cambio climático.

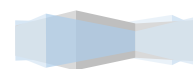


Además, el cambio climático no es el único impacto medioambiental negativo derivado del uso de fuentes energéticas no renovables. La generación eléctrica en plantas de carbón, fuel o gas natural produce la emisión a la atmósfera de compuestos contaminantes diversos, responsables de diferentes daños medioambientales. En esta revolución, una de las fuentes de energía renovables más conocidas es la solar. Dentro de las posibilidades que ofrece la energía solar encontramos dos ramas bien diferenciadas: la energía fotovoltaica y la energía solar térmica. La energía fotovoltaica permite obtener energía eléctrica a partir de la radiación solar, de forma que es habitual encontrar huertos solares en grandes extensiones a lo largo de toda la geografía nacional.

Por otro lado, la energía solar térmica emplea la radiación que llega del sol para calentar un fluido caloportador. Dentro de todas las posibilidades de uso de esta tecnología, cabe destacar la producción de agua caliente sanitaria (ACS), agua para circuitos de calefacción, en la producción de vapor de agua para ciclos térmicos (en caso de concentrar la radiación solar sobre el fluido) o incluso como foco caliente de los ciclos de frío por absorción.

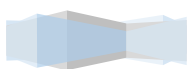
Dentro del gran abanico de los modelos empleados en la energía solar térmica, aquellos más cercanos a todos los individuos de la sociedad son los colectores/captadores solares planos. El empleo de colectores solares en viviendas está ligado a la producción de ACS, de forma que se reduce el consumo de combustibles fósiles y electricidad para su producción. En el Código Técnico de la Edificación se recoge que los edificios de nueva construcción obtengan un porcentaje del ACS demandado mediante energía solar térmica. Esta tecnología lleva avanzando desde los años 70, cuando se desarrolló y comenzó su implantación, sobre todo a partir de la crisis global de 1973. Desde entonces, muchos han sido los investigadores que han buscado la mejora del rendimiento de los colectores solares, para aprovechar al máximo la radiación solar por lo que la eficiencia de los colectores solares se ha mejorado progresivamente. Estas mejoras se pueden atribuir al uso de nuevos materiales y recubrimientos selectivos, la mejora de los aislamientos térmicos y el desarrollo de tratamientos adecuados a la cubierta de vidrio para mejorar el efecto invernadero en el interior del captador.

Debido a esto, en la actualidad, una de las pocas alternativas para incrementar la eficiencia de los colectores solares planos pasa por mejorar la transferencia de calor entre el



absorbedor y el fluido calo-portador. Ésta puede mejorarse bien reduciendo la resistencia térmica de la soldadura absorbedor-tubo o bien mejorando el coeficiente interno de transmisión de calor por convección. En el primer caso existen serias limitaciones debido a que la lámina del absorbedor es de un espesor muy pequeño y la técnica de soldadura es compleja. En el segundo caso se puede conseguir una mejora de la transferencia de calor mediante la utilización de dispositivos insertados tipo muelle o láminas en espiral.





1.1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.

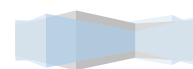
1.1.1 ANTECEDENTES.

Este proyecto, que ha sido desarrollado por el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena, se enmarca dentro del área de investigación de *“Mejora de la transferencia de calor en captadores solares térmicos”* del Grupo de Investigación del departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Los grupos de investigación de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Térmica, y Modelado de Sistemas Térmicos y Energéticos de dicho Departamento han participado en diferentes contratos y proyectos de investigación relacionados con las energías renovables, entre los que cabe reseñar:

- Contratos de colaboración Art. 83 con ARGEM (Agencia Regional de Gestión de la Energía de la Región de Murcia) entre los que se destacan: 2578/08-ITF *“Desarrollo de un banco de ensayos de captadores solares térmicos”*, 2577/08 ITF *“Desarrollo de un colector solar térmico con transmisión de calor mejorada”*, 2579/08 ITF *“Desarrollo de un colector de concentración de pequeño tamaño para la aplicación en frío solar”* y 2580/08 ITF *“Desarrollo, instrumentación y modelado de una instalación de absorción asistida con energía solar en la UPCT”*.
- Proyecto de Investigación *“Desarrollo de un colector solar plano mejorado y evaluación del rendimiento y prestaciones termo-hidráulicas”* de la Fundación Séneca de la Región de Murcia (1/01/2009 a 31/12/2010)
- Convenio marco de colaboración en el Centro Tecnológico de la Energía y del Medio Ambiente (CETENMA) firmado en julio de 2008.

En 2007, durante el desarrollo del proyecto denominado *“Dimensionado hidráulico óptimo de los componentes del circuito primario de una instalación solar térmica”* llevado a cabo por ARGEM y el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la UPCT, se detectó que el captador solar desempeña un papel fundamental no sólo en el funcionamiento del sistema, sino también en la eficiencia energética global. ARGEM

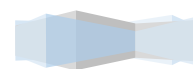


junto con algunas empresas fabricantes de captadores solares demostraron especial interés por algunas de las conclusiones del estudio citado anteriormente. En estas conclusiones se justifica el interés que puede tener el desarrollo de una investigación específica de carácter aplicado con el objetivo de mejorar las prestaciones termo-hidráulicas del campo de captadores solares en su conjunto, es decir, tanto de la mejora de transferencia térmica en cada captador como componente individual, como de la simplificación de la red de conductos necesarios para constituir un sistema hidráulico equilibrado (especialmente cuando la superficie de captación y por tanto el número de colectores es elevado y estos deben ser acoplados entre sí de la forma más eficiente posible).

1.1.2 OBJETIVOS.

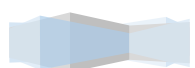
En el marco descrito anteriormente, y dentro de la línea “*Estudio y mejora de la eficiencia de sistemas solares térmicos*”, se ubica el presente proyecto. En dicho área, una de las líneas de investigación abiertas es la mejora de la transferencia de calor en los colectores solares mediante elementos insertados. Los trabajos realizados en materia de procedimiento experimental, en la que se centra este PFC, se vienen desarrollando durante los últimos cinco años en los dos bancos de ensayo de los que dispone la Universidad. Existe uno exterior, en el que se pueden ensayar dos captadores a escala real simultáneamente montados sobre un seguidor solar a dos ejes, y otro interior, donde se realizó este PFC, en el que se ha podido ensayar en condiciones mucho más controladas también dos captadores solares, aunque en este caso a escala y formados únicamente por tres tubos cada uno.

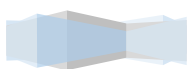
Se pretende seguir con el estudio experimental ya realizado por compañeros para el Cálculo experimental del número de Nusselt. En ensayos anteriores, se experimentó tanto con tubos sin ningún elemento insertado, como con diferentes tipos de elementos insertados con forma de muelles, con diferentes pasos; en el presente proyecto se estudia el número de Nusselt con otro tipo de geometría insertada en los tubos, con forma de lámina helicoidal, para mejorar la superficie de transferencia de calor y aumentar así la eficiencia del captador.



Además, este trabajo experimental se ve complementado con los trabajos realizados de simulación numérica de otros PFC anteriores. Como objetivos específicos de dicho proyecto podemos citar los siguientes:

- Evaluación y mejora de la instalación destinada a realizar ensayos de transferencia de calor en tubos de pequeño diámetro de captadores solares con elementos insertados.
- Describir cada uno de los elementos que componen la instalación experimental, especificando la función que desempeñan cada uno de ellos dentro de la misma.
- Obtener el número de Nusselt en tubo con elementos insertados con la condición de contorno de flujo de calor constante sobre el absorbedor, en las condiciones de trabajo típicas de colectores solares térmicos (número de Rayleigh y número de Reynolds).
- Obtener las incertidumbres de medida en el cálculo del número de Nusselt para elementos insertados.
- Obtener el factor de fricción isoterma de las geometrías seleccionadas.
- Estudiar experimentalmente la evolución de la temperatura de absorbedor en condiciones de tubo liso y tubo con elementos insertados.



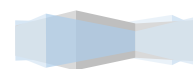


1.2 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.

La energía solar térmica es una alternativa muy interesante en una gran variedad de aplicaciones, entre las que se encuentra el agua caliente sanitaria, la calefacción, la climatización de piscinas, o la producción de calor en multitud de procesos industriales.

A la larga lista de usos plenamente probados y contrastados tras varias décadas de experiencia, hay que añadir otros que empiezan a tener grandes expectativas de desarrollo a corto y medio plazo, como es el caso de la refrigeración de ambientes por medio de procedimientos solares. Podemos destacar los siguientes:

- **Producción de agua caliente sanitaria.** En la actualidad la energía solar térmica ofrece una solución idónea para la producción de agua caliente sanitaria, al ser una alternativa completamente madura y rentable. Entre las razones que hacen que esta tecnología sea muy apropiada para este tipo de usos, cabe destacar los niveles de temperaturas que se precisan alcanzar (normalmente entre 40 y 45 °C), que coinciden con los más adecuados para el buen funcionamiento de los sistemas solares que se comercializan en el mercado.
- **Sistemas de calefacción.** En el centro y en el norte de Europa resulta muy habitual emplear este tipo de instalaciones para cubrir parte de la demanda de calefacción. Además, estos equipos suelen ser compatibles con la producción de agua caliente sanitaria, existiendo elementos de control que dan paso a la calefacción una vez que se han cubierto las necesidades de agua caliente, o bien aprovechando el calor del fluido que circula en el captador para calentar el espacio cuando la calefacción funciona a temperaturas menos elevadas.
- **Climatización de piscinas.** La climatización del agua para piscinas constituye otra aplicación interesante, tanto si se trata de instalaciones cubiertas como a la intemperie. Estas últimas merecen especial atención al existir en gran número y al conseguir resultados más que satisfactorios con sistemas sencillos y baratos.
- **Refrigeración en edificios.** El aprovechamiento de la energía solar para producir frío es una de las aplicaciones térmicas con mayor futuro, pues las épocas en las que más se necesita enfriar el espacio coinciden con las que se disfruta de mayor radiación solar. Además, esta alternativa a los sistemas de refrigeración convencionales es doblemente atractiva porque permite aprovechar



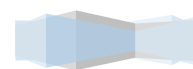
las instalaciones solares durante todo el año, empleándolas en invierno para la calefacción y en verano para la producción de frío.

- **Usos en la industria.** La energía solar también reporta importantes beneficios en el ámbito de la industria, de modo especial en los procesos que requieren un considerable caudal de calor para secar, cocer, limpiar o tratar ciertos productos.

1.2.1 CAPTACIÓN ENERGÉTICA.

Los esfuerzos de la incipiente industria solar se concretan en la conversión de la radiación en dos formas finales de energía, ambas de suma utilidad: el calor y la electricidad. En el primer caso se habla de conversión solar térmica, que emplea colectores térmicos, en los que un fluido recoge el calor que la radiación produce en el colector. La cantidad de energía cedida por la radiación depende, además de la radiación incidente de la capacidad de absorción del cuerpo en cuestión. Así, un cuerpo con una superficie altamente reflectante devolverá la mayor parte de la radiación que reciba y, por tanto, no se calentará demasiado al exponerse al sol. Por el contrario los cuerpos poco reflectantes aprovecharán toda la energía radiante que les llegue, convirtiéndola en térmica y calentándose apreciablemente. Los cuerpos oscuros o negros presentan dicho aspecto porque su superficie tiene una composición adecuada para absorber casi todas las longitudes de onda del espectro de luz visible.

El captador de energía más simple posible es un cuerpo pintado de negro mate y con una conductividad térmica alta para que la energía térmica pueda propagarse con facilidad a la zona que nos interese, normalmente basta una red de tubos por donde circula el fluido encargado de recoger a su vez esta energía térmica. De todo el flujo energético que el colector recibe, tan sólo una parte es recogida por el fluido caloportante debido a las pérdidas que se observan. Estas pérdidas pueden ser por radiación, convección y conducción; y aumentan al aumentar la temperatura del absorbedor. Por esta razón interesa hacer trabajar a los colectores a la temperatura más baja posible, siempre que dicha temperatura sea suficiente para la utilización específica de cada caso. Las pérdidas dependerán de varios factores: estructurales, orientación de las placas, pérdidas por reflexión, aislantes empleados, velocidad del viento, etc.



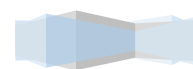
Por tanto será conveniente seleccionar el tipo de colector empleado en nuestra aplicación atendiendo a los fines específicos a los que va destinado, a las características de sus partes fundamentales y a los materiales destinados a su fabricación. La conversión solar eléctrica puede lograrse fundamentalmente por medio de dos procedimientos, totalmente distintos entre sí tanto por su tecnología como por su campo de aplicación.

El primero de ellos se basa en el efecto fotovoltaico, cuyos fundamentos teóricos están en la Física Cuántica, y se trata de un fenómeno por el que los fotones, incidiendo sobre determinados materiales y en condiciones adecuadas, pueden generar una diferencia de potencial susceptible de mantener una corriente eléctrica, la cual puede ser recogida y aprovechada.

La segunda forma de producir electricidad a partir de la energía solar se basa en un proceso termodinámico, y consiste en la utilización de generadores eléctricos de tecnología convencional mediante ciclos de potencia, en donde la energía térmica necesaria para impulsar al fluido a través de los álabes de la turbina que mueve al generador es producida por la energía solar recogida y concentrada convenientemente a fin de poder alcanzar las altas temperaturas que el proceso requiere.

La utilización de la energía solar tiene por tanto enormes posibilidades, pero presenta también algunos obstáculos para su generalización:

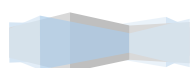
- **Está sometida a continuas fluctuaciones y a variaciones más o menos bruscas.** Así, por ejemplo, energía incidente sobre los colectores es menor en invierno, precisamente cuando más la necesitamos.
- **La energía solar resulta todavía más cara que otras formas de energía.** La política de subvenciones puede impulsar su uso, pero conviene recordar que al final las subvenciones se costean con dinero del contribuyente y que son ayudas económicas que han de repartirse entre todos los usuarios, con lo que un aumento de estos reduciría la porción total que recibiría cada uno. Al igual que con otras innovaciones, la introducción de estos aparatos es en gran medida una cuestión económica, materia especialmente difícil.
- **La baja intensidad de la energía solar.** Se ha calculado que la energía necesaria para la construcción de un colector fotovoltaico se conseguiría a los cuatro años



de funcionamiento de éste en una localización de carácter medio de irradiación incidente. En el caso de colectores térmicos esta equivalencia sería de un año de funcionamiento en localizaciones soleadas.

Aunque con sistemas de captadores solares se podría conseguir una parte importante del suministro de energía en zonas desarrolladas, durante bastante tiempo las comunidades de estas zonas seguirán apoyándose en otros procedimientos para obtener su energía. La variación de la intensidad según la hora y la estación, y la gran proporción de tiempo al día en que no podemos contar con la energía solar era uno de los obstáculos para los sistemas de aprovechamiento de la energía solar.

Siempre que se diseñe un sistema de calefacción o de refrigeración de edificios, producción de energía eléctrica para uso continuo y cualquier otra utilización en la que la variación de la demanda no coincida con la variación de suministro, hay que habilitar un sistema de almacenamiento de la energía. Este puede ser obviado cuando se prevea la utilización de una fuente auxiliar, para aquellas ocasiones en que el suministro no pueda satisfacer la demanda.



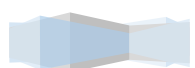
1.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

1.3.1 CONVECCION.

El concepto de convección abarca el proceso de transferencia de calor mediante el movimiento de un líquido o un gas, durante este proceso, el calor se transporta simultáneamente por conducción y por convección. Por convección se entiende el proceso de transporte de calor que tiene lugar en virtud del movimiento de las macropartículas del líquido o del gas en el espacio desde una región a otra región de temperatura diferente. La convección es posible solamente en un medio fluido. Por conducción se entiende el proceso de transferencia de calor a través del contacto directo entre las partículas individuales del sólido o entre sólidos a distinta temperatura distinta. La convección va siempre acompañada de la conducción, puesto que el contacto entre partículas a distintas temperaturas durante el movimiento del gas o del líquido es inevitable.

Las aplicaciones de la convección a la ingeniería atañen, en general, al intercambio de calor entre el flujo de un fluido y la superficie de un sólido. Generalmente los cálculos se reducen al intercambio de calor, puesto que el proceso de convección que tiene lugar en el propio medio fluido (líquido o gas), solo interesa cuando afecta al transporte de calor entre este y el sólido. Como regla se puede establecer que en la convección el flujo de calor se dirige siempre hacia el lado de menos temperatura.

El proceso de transmisión de calor entre un sólido, un medio fluido y viceversa, es muy complejo, y el coeficiente de transmisión superficial depende de muchos factores. En el caso más general, este dependerá de la forma y dimensiones del sólido, de las condiciones del flujo, de la temperatura, velocidad y propiedades físicas del fluido y otros parámetros.



El proceso de transferencia de calor por convección se puede clasificar de acuerdo con la naturaleza y el origen del movimiento del flujo, ellas son:

- ✓ Convección forzada.
- ✓ Convección natural.
- ✓ Convección Mixta.

1.3.1.1 CONVECCIÓN FORZADA EN TUBOS Y CONDUCTOS.

Se conoce como convección forzada al proceso de la transferencia de calor por convección cuando el flujo de fluido es conducido a través de un gradiente de presión. Para ello, el flujo de fluido se hace circular por tubos y conductos con una sección transversal determinada, dando lugar al crecimiento y desarrollo de capas límite en los mismos. En la mayoría de fluidos, determinando el diámetro hidráulico del conducto, es posible obtener representaciones de la capa límite del flujo y representaciones adimensionales respecto las pérdidas por fricción y el coeficiente de transferencia de calor.

El diseño, dimensionado y análisis de intercambiadores de calor requiere que se conozca el coeficiente de la transferencia de calor entre la pared del conducto y el fluido de su interior, ya que los diseños dependen en gran medida de este coeficiente.

Una vez conocido, para una geometría y condiciones de flujo dadas, la transferencia de calor para una diferencia de temperatura dada es:

$$q_c = \overline{h_c} A (T_s - T_f) \quad (1.3. 1)$$

Donde,

$\overline{h_c}$ Coeficiente de transferencia de calor por convección

A Área superficial de contacto

T_s Temperatura de la superficie

T_f Temperatura del fluido



También se puede utilizar la misma relación para determinar el área requerida para transferir calor a una tasa específica para un potencial de temperatura dado. Sin embargo, mientras que el fluido avanza por el conducto, su temperatura varía a lo largo del mismo. Por lo tanto, la temperatura del fluido debe ser definida con rigor y precisión, a fin de caracterizar correctamente la transferencia de calor.

El coeficiente de transferencia de calor h_c se puede obtener a partir del número de Nusselt Nu y el diámetro hidráulico D_H . Este último se obtiene a partir de la expresión:

$$D_H = 4 \frac{\text{Área transversal del flujo}}{\text{Perímetro mojado}} \quad (1.3. 2)$$

Mientras que Nu se obtiene generalmente mediante resultados experimentales, siguiendo la forma:

$$Nu = \phi(Re)\psi(Pr) \quad (1.3. 3)$$

Para una tubería circular, el área de la sección transversal es $\pi D^2/4$ y el perímetro mojado es πD y por tanto el diámetro interior del tubo es igual al diámetro hidráulico.

Para una región anular formada entre dos tubos concéntricos se tiene:

$$D_H = 4 \frac{(\pi/4)(D_2^2 - D_1^2)}{\pi(D_1 + D_2)} = D_2 - D_1 \quad (1.3. 4)$$

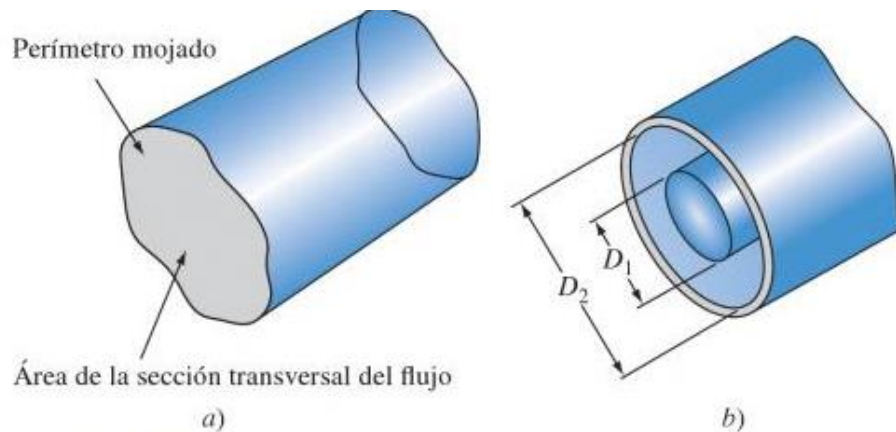


Figura 1 : Diámetro hidráulico de: a) una sección transversal irregular y b) una región anular.



➤ FACTORES DE ESTUDIO.

Temperatura de referencia del fluido.

El valor numérico de h_c depende de la temperatura de referencia del fluido. Ya se ha indicado que la temperatura del fluido varía en la dirección del gasto másico \dot{m} y en la dirección del flujo de calor. Por lo tanto, para una sección transversal del conducto, se puede tomar como temperatura de referencia la del fluido en el centro del mismo.

Debido a la dificultad de su medida experimental, se emplea la temperatura media del volumen fluido, T_b , siendo la temperatura media del fluido en una sección transversal.

De esta manera, el balance de calor en estado estacionario, consiste en la medida directa de la transferencia de calor entre dos secciones del conducto:

$$q_c = \dot{m}c_p\Delta T_b \quad (1.3. 5)$$

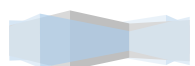
q_c	Calor por convección
\dot{m}	Gasto másico
c_p	Calor específico a presión constante
ΔT_b	Diferencia de temperatura promedio del volumen fluido entre las dos secciones transversales en cuestión

Efecto del número de Reynolds en la transferencia de calor y caída de presión.

Para un fluido dado, el número de Nusselt depende principalmente de las condiciones del flujo, que se pueden estandarizar por el número de Reynolds, Re .

En caso de que los efectos de entrada no sean importantes, en función de Re :

- $Re < 2100$: flujo laminar. No existe mezcla de partículas fluidas por la aparición de remolinos, por lo que la transferencia de calor tiene lugar por conducción, siendo el coeficiente de transferencia de calor muy pequeño.
- $2100 \leq Re < 10000$: flujo transicional. Tiene lugar la mezcla desde el fluido caliente al frío, causada por la aparición de remolinos. Esto provoca un



incremento notable en el coeficiente de transferencia de calor, aumentado Nu a gran velocidad.

- $10000 < Re$: flujo turbulento. En este caso, la turbulencia provoca que la transferencia de calor siga aumentando, aunque el ratio de crecimiento no es tan elevado como en el flujo transitorio.

La explicación de este fenómeno puede realizarse a través de la Figura 2; en la misma se observa que el flujo es totalmente turbulento, a excepción de una fina capa límite adyacente a la pared. Los remolinos provocados por la turbulencia son expulsados de la capa límite debido a las fuerzas viscosas predominantes cerca de la superficie del tubo, teniendo lugar en esta capa una transferencia de calor por conducción. Las flechas circulares representan los remolinos que pasan por el borde de la capa, probablemente penetrándola, y tomando el fluido a la temperatura de la capa, mezclando estas partículas fluidas, transmitiendo calor entre la capa viscosa y el volumen turbulento del fluido.

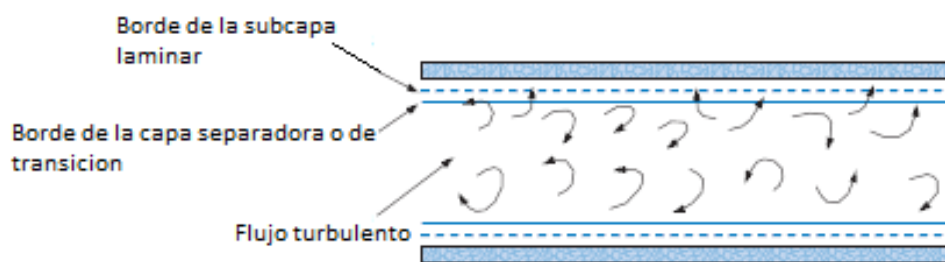
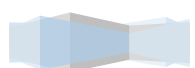


Figura 2: Estructura de flujo para un fluido en flujo turbulento a través de un tubo.

Por lo tanto, la resistencia térmica de la capa viscosa es responsable directa de la transferencia de calor entre la superficie del conducto y el fluido. Por otro lado, el flujo turbulento ofrece poca resistencia al flujo de calor, por lo que para aumentar el coeficiente de transferencia de calor es necesario disminuir la resistencia térmica de la capa viscosa.

Esto se logra aumentando la turbulencia del flujo principal, dando lugar a que los remolinos penetren más profundamente en la capa viscosa. Sin embargo, esto provoca un aumento en la caída de presión por fricción, debiendo buscarse un compromiso entre ambos extremos.



Efecto del número de Prandtl.

El número de Prandtl depende exclusivamente de las propiedades del fluido, relacionando la difusividad viscosa y la difusividad térmica del fluido.

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (1.3. 6)$$

Pueden darse los casos:

- $Pr = 1$: los perfiles de velocidad y temperatura son idénticos, por lo que los espesores de sus capas límite son iguales.
- $Pr < 1$: el gradiente de temperatura cerca de una superficie es menos pronunciado que el gradiente de velocidades, por lo que el espesor de la capa límite del perfil de velocidad es menor que el de la capa límite térmica.
- $Pr > 1$: el gradiente de temperatura cerca de una superficie es más pronunciado que el de velocidades, por lo que el espesor de la capa límite del perfil de velocidad es mayor que el de la capa límite térmica.

Por otro lado, para un valor de Reynolds dado, el gradiente de temperaturas en la pared es más pronunciado a mayor número de Prandtl; en consecuencia, a un número de Reynolds dado, los fluidos con números de Prandtl mayores tienen números de Nusselt mayores.

Efectos de entrada.

Además del número de Reynolds y del de Prandtl, existen otros factores que pueden influir en la transferencia de calor por convección forzada en un conducto; por ejemplo, cuando el conducto es corto, los efectos de entrada son importantes.

Cuando el fluido entra en un conducto con una velocidad uniforme, las partículas adyacentes a la pared del tubo tienden a situarse junto a la misma. Esto provoca que a cierta distancia de la entrada tenga lugar la aparición de una capa laminar límite a lo largo de la pared, de forma que al aumentar la turbulencia del flujo, esta capa también se vuelva



turbulenta. Esta capa incrementará su espesor hasta ocupar el conducto entero. En este punto, el perfil de velocidades permanece sin cambios.

El desarrollo de la capa límite térmica es similar a la de la capa límite hidrodinámica. Al igual que la capa hidrodinámica, la capa térmica aumenta su espesor hasta que el calor es transferido entre el conducto y el centro del fluido. El perfil de temperaturas permanece prácticamente constante cuando el perfil de velocidades está completamente desarrollado.

La forma final de los perfiles de velocidad y temperatura depende del tipo de flujo completamente desarrollado (laminar o turbulento).

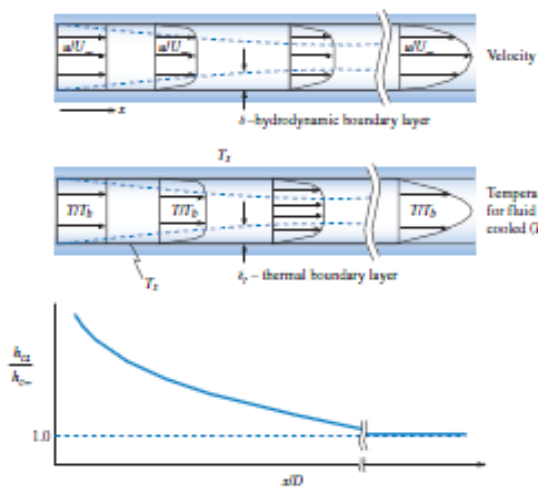


Figura 3:

Distribución de velocidades, perfil de temperaturas y variación del coeficiente de transferencia de calor cerca de la entrada de un tubo en el que se enfría aire, en régimen laminar, con T_s uniforme.

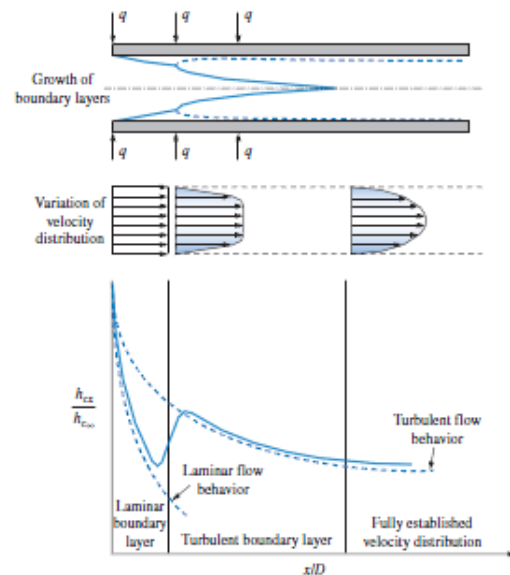


Figura 4: Distribución de velocidad y variación del coeficiente de transferencia de calor cerca de la entrada de un tubo con calor uniforme, para un fluido en flujo turbulento.

Si la entrada posee canto, el desarrollo inicial de las capas límite hidrodinámica y térmica es similar al que tiene lugar en el caso de flujo a lo largo de una placa plana. El coeficiente de transferencia de calor es mayor a la entrada del conducto y decrece a lo largo del mismo, hasta que tiene lugar la estabilización de los perfiles de velocidad y temperatura del flujo, como se observa en la Figura 3 y la Figura 4.



Para flujo laminar, los perfiles de velocidades y de temperatura alcanzan su forma completamente desarrollada a la distancia recorrida obtenida de las Ecuaciones (1.3.7) y (1.3.8), respectivamente.

$$\left(\frac{x}{D}\right)_{lam} = 0,05 Re_D \quad (1.3. 7)$$

$$\left(\frac{x}{D}\right)_{lam,T} = 0,05 Re_D Pr \quad (1.3. 8)$$

Para flujo turbulento, los efectos de entrada desaparecen a una distancia de $10 \sim 20D$.

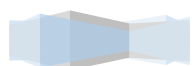
Variación de las propiedades físicas.

La variación de las propiedades físicas a causa de la temperatura influye considerablemente en los fenómenos estudiados. Para el caso de los líquidos, la viscosidad es la propiedad más relevante, mientras que para los gases influyen la conductividad térmica, densidad, etc. En cualquier caso, el valor de Re depende de la localización donde se evalúen estas propiedades físicas. Por ello se emplea el valor de Re basado en la T_b , parámetro significativo en la descripción de las condiciones del flujo.

La temperatura es otro factor que puede influenciar considerablemente la transferencia de calor y el rozamiento. Cuando un fluido dentro de un conducto se calienta o se enfría, su temperatura al igual que sus propiedades físicas, varían a lo largo del conducto, así como también sobre cualquier sección transversal dada. Para líquidos la dependencia de la viscosidad con la temperatura es de principal importancia. Para los gases, además de la viscosidad, la conductividad térmica y la densidad varían significativamente con la temperatura. En ambos casos, el valor numérico del número de Reynolds depende de la posición donde se evalúa la viscosidad.

Condiciones térmicas de contorno.

Para aquellos fluidos que cumplen $Pr \leq 1$, el coeficiente de transferencia de calor depende de las condiciones térmicas de contorno. Cuando el calor se transfiere hacia o desde gases que fluyen a muy altas velocidades, los efectos de compresibilidad influyen al flujo y a la transferencia de calor.



Para las mismas condiciones geométricas, y de Re y Pr del mismo valor, el coeficiente h_c para un caso de temperatura uniforme en la pared difiere del obtenido en caso de una entrada constante de calor.

Precisión en predicción de calores de los coeficientes de transferencia de calor.

Al tratarse de ecuaciones obtenidas empíricamente, es importante recordar que los valores predichos en estas correlaciones no son exactos, viniendo indicado en la correlación el ajuste con respecto los datos experimentales.

En la aplicación de problemas prácticos para la convección forzada, los valores del coeficiente de transferencia de calor no son exactos. En flujo turbulento o laminar, la precisión del coeficiente de transferencia de calor, obtenido a partir de cualquier ecuación o grafica disponible, puede tener hasta de 30%. En la región de transición, donde los datos experimentales son escasos, la precisión del número de Nusselt obtenido de la información disponible, puede aún ser inferior.

➤ ANÁLISIS DE CONVECCIÓN FORZADA EN FLUJO LAMINAR.

En esta sección, se estudiara la transferencia de calor en convección forzada, en caso de existir un flujo de calor uniforme en las paredes del conducto, así como el caso de una temperatura de pared uniforme.

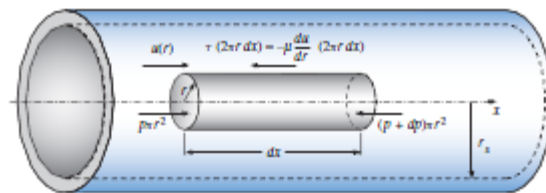
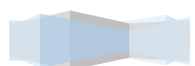


Figura 5: Balance de fuerzas en un elemento fluido dentro de un tubo de radio r_s .

En primer lugar, se estudia el flujo del fluido, sin tener en cuenta la transferencia de calor, para posteriormente introducir el balance energético para cada uno de los casos de estudio.



Partiendo de la Figura 5, realizando un balance entre las fuerzas de presión y las viscosas, tomando como condiciones de contorno $u = 0$ en $r = r_s$:

$$\pi r^2[p - (p + dp)] = \tau 2\pi r dr = -\left(\mu \frac{du}{dr}\right) 2\pi r dr \quad (1.3. 9)$$

$$du = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{dp}{dx}\right) r dr \quad (1.3. 10)$$

$$u(r) = \frac{r^2 - r_s^2}{4\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1.3. 11)$$

$$\frac{u(r)}{u_{m\acute{a}x}} = 1 - \left(\frac{r}{r_s}\right)^2 \quad (1.3. 12)$$

La pérdida de carga a lo largo del tubo de longitud L es de la forma:

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{\rho \bar{U}^2}{2g} \quad (1.3. 13)$$

$$\dot{m} = \rho \int_0^{r_s} u 2\pi r dr = \frac{\Delta p \pi \rho}{2L\mu} \int_0^{r_s} (r^2 - r_s^2) r dr = -\frac{\Delta p \pi r_s^4 \rho}{8L\mu} \quad (1.3. 14)$$

$$\bar{U} = \frac{\dot{m}}{\rho \pi r_s^2} \quad (1.3. 15)$$

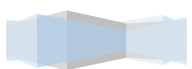
Por lo que:

$$\Delta p = \frac{64}{Re_D} \frac{L}{D} \frac{\rho U^2}{2g} \quad (1.3. 16)$$

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (1.3. 17)$$

Y la potencia de bombeo:

$$P_p = \frac{\Delta p \dot{Q}}{\eta_p} \quad (1.3. 18)$$



Transferencia de calor mediante flujo de calor uniforme.

Para el estudio de la misma se empleará el volumen de control de la Figura 7.

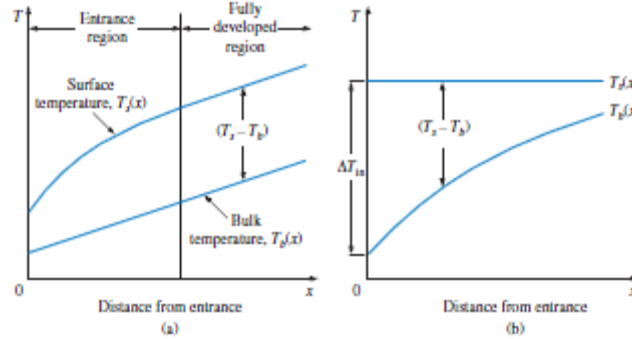


Figura 6: Variación de T_b con flujo de calor uniforme (a) y con T_s constante (b).

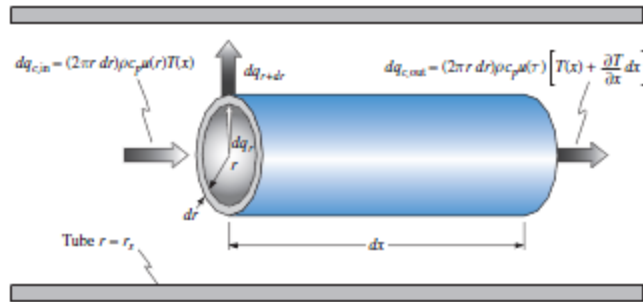


Figura 7: Volumen de control para el análisis energético en flujo de un tubo.

En flujo laminar, el calor es transferido en la dirección radial por conducción, mientras que en la dirección axial se transfiere por convección.

La transferencia de calor por conducción en el elemento fluido es:

$$dq_{k,r} = -k2\pi r \frac{\partial T}{\partial r} \quad (1.3. 19)$$

Mientras que fuera del mismo es de la forma:

$$dq_{k,r+dr} = -k2\pi(r + dr)dx \left[\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} dr \right] \quad (1.3. 20)$$



La transferencia de calor por convección fuera del elemento es:

$$dq_c = 2\pi r dr \rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} dx \quad (1.3. 21)$$

Realizando un balance energético neto, que relacione la transferencia de calor por conducción global, y la transferencia por convección:

$$dq_{k,r+dr} - dq_{k,r} = dq_c \quad (1.3. 22)$$

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) dx dr = \tau \rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} dx dr \quad (1.3. 23)$$

Despreciando los términos de segundo orden y reordenando los términos:

$$\frac{1}{ur} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.3. 24)$$

Debido a que el flujo de calor sobre la superficie es uniforme, la temperatura del fluido aumenta linealmente en la dirección axial $\partial T / \partial x = C$ por lo que la Ecuación (1.3.24) pasa a ser una EDO con r como la única coordenada espacial.

Las condiciones de contorno para la Ecuación (1.3.24) son

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad r = 0 \quad (1.3. 25)$$

$$\left| k \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_s} = q_s'' \quad r = r_s \quad (1.3. 26)$$

Sustituyendo el perfil de velocidades de la Ecuación (1.3.13) en la (1.3.24), e integrando por dos veces con respecto r, y empleando las condiciones de contorno anteriores, se obtiene la distribución de temperaturas:

$$T - T_c = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{u_{\max} r_s^2}{4} \left[\left(\frac{r}{r_s} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{r}{r_s} \right)^4 \right] \quad (1.3. 27)$$

La temperatura T_b se obtiene a partir de la expresión:

$$T_b = \frac{\int_0^{r_s} (\rho u c_p T) 2\pi r dr}{c_p \dot{m}} \quad (1.3. 28)$$



Evaluando así $T_b - T_c$, y contrastándolo con la Ecuación (1.3.27) para $r = r_s$, y sustituyendo en la Ecuación (1.3.1):

$$\overline{h_c} = \frac{q_c}{A(T_s - T_b)} = \frac{k \left(\partial T / \partial r_{r=r_s} \right)}{T_s - T_b} = \frac{24k}{11r_s} = \frac{48k}{11D} \quad (1.3. 29)$$

$$\overline{Nu_D} = \frac{\overline{h_c} D}{k} = 4,364 \quad (1.3. 30)$$

Obteniéndose este valor medio de Nu para el caso de transferencia de calor flujo de calor uniforme, una vez desarrollado el flujo.

Temperatura de pared uniforme.

En este caso, la Ecuación 1.3.24 ha de resolverse teniendo en cuenta que ahora, la diferencia de temperaturas entre la pared y el fluido varía a lo largo del tubo; además de que $T(x, r_s) = C$. Empleando un proceso iterativo, se llega a obtener otro valor medio de Nu :

$$\overline{Nu_D} = \frac{\overline{h_c} D}{k} = 3,66 \quad (1.3. 31)$$

Puesto que la diferencia de temperatura entre la pared y el fluido no es constante, es necesario emplear otros valores de temperatura para evaluar la transferencia de calor. El balance de calor en el conducto es:

$$dq_c = \dot{m} c_p dT_b = q_s'' P dx \quad (1.3. 32)$$

Donde P es el perímetro de la sección del conducto.

Así, el gradiente de temperaturas es de la forma:

$$\frac{dT_b}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m} c_p} = \frac{P}{\dot{m} c_p} h_c (T_s - T_b) \quad (1.3. 33)$$

Puesto que $dT_b/dx = d(T_b - T_s)/dx$ en el caso de que $T_s = C$, reordenando variables:

$$\int_{\Delta T_{int}}^{\Delta T_{out}} \frac{d\Delta T}{\Delta T} = - \frac{P}{\dot{m} c_p} \int_0^L h_c dx \quad (1.3. 34)$$



$$\ln\left(\frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}}\right) = -\frac{P}{\dot{m}c_p}\bar{h}_c \quad (1.3. 35)$$

Donde $\Delta T = T_s - T_b$ y los subíndices *in* y *out* se refieren a dicha diferencia en la entrada y salida del conducto. El coeficiente de transferencia de calor promedio es:

$$\bar{h}_c = \frac{1}{L} \int_0^L h_c dx \quad (1.3. 36)$$

Puesto que $T_s = C$, la transferencia de calor por convección en el tubo se puede expresar como:

$$q_c = \dot{m}c_p[(T_s - T_{b,in}) - (T_s - T_{b,out})] = \dot{m}c_p(\Delta T_{in} - \Delta T_{out}) \quad (1.3. 37)$$

$$q_c = \bar{h}_c A_s \left[\frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\ln(\Delta T_{out}/\Delta T_{in})} \right] \quad (1.3. 38)$$

Donde $\ln(\Delta T_{out}/\Delta T_{in})$ es la diferencia de temperatura media logarítmica LMTD.

➤ ANÁLISIS DE CONVECCIÓN FORZADA EN FLUJO TURBULENTO.

Para analizar la transferencia de calor en régimen turbulento, es necesario realizar una analogía entre la transferencia de calor y la cantidad de movimiento. Los cálculos realizados a continuación se hacen suponiendo un $Pr=1$, aunque hasta cierto punto es aplicable a todos los tipos de flujo, siendo necesario realizar modificaciones mediante coeficientes de corrección empíricos.

El calor transferido por unidad de área puede ser presentado como:

$$\frac{q_c}{A\rho c_p} = -\left(\frac{k}{\rho c_p} + \varepsilon_H\right) \frac{dT}{dy} \quad (1.3. 39)$$

Por otro lado, el esfuerzo cortante causado por las fuerzas viscosas y la cantidad de movimiento transferida es:

$$\frac{\tau}{\rho} = \left(\frac{\mu}{\rho} + \varepsilon_H\right) \frac{du}{dy} \quad (1.3. 40)$$



Como se puede observar, q y τ varían con respecto y , de la misma manera. Por tanto, para un régimen turbulento completamente desarrollado, el esfuerzo cortante aumenta linealmente con la coordenada radial r . Así, se tiene que:

$$\frac{\tau}{\tau_s} = \frac{r}{r_s} = 1 - \frac{y}{r_s} \quad (1.3.41)$$

$$\frac{q_c/A}{(q_c/A)_s} = \frac{r}{r_s} = 1 - \frac{y}{r_s} \quad (1.3.42)$$

Siendo el subíndice s indicativo de la coordenada en la superficie del conducto.

Así, introduciendo respectivamente, las ecuaciones (1.3.41) y (1.3.42) en (1.3.40) y (1.3.39), se obtiene:

$$\frac{\tau_s}{\rho} \left(1 - \frac{y}{r_s}\right) = \left(\frac{\mu}{\rho} + \varepsilon_H\right) \frac{du}{dy} \quad (1.3.43)$$

$$\frac{q_{c,s}}{A\rho c_p} \left(1 - \frac{y}{r_s}\right) = -\left(\frac{k}{\rho c_p} + \varepsilon_H\right) \frac{dT}{dy} \quad (1.3.44)$$

Si $\varepsilon_M = \varepsilon_H$, las partes de la derecha de las ecuaciones anteriores, y si la difusividad de la cantidad de movimiento iguala a la difusividad calorífica, $Pr=1$, y relacionando ambas expresiones:

$$\frac{q_{c,s}}{A\rho c_p \tau_s} du = -dT \quad (1.3.45)$$

Integrando entre la pared del tubo ($u = 0, T = T_s$) y el volumen fluido ($u = \bar{U}, T = T_b$):

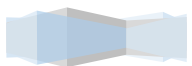
$$\frac{q_c \bar{U}}{A\rho c_p \tau_s} = T_s - T_b \quad (1.3.46)$$

Reescribiendo:

$$\frac{\tau_s}{\rho \bar{U}^2} = \frac{q_s}{A_s(T_s - T_b)} \frac{1}{c_p \rho \bar{U}} = \frac{\bar{h}_c}{c_p \rho \bar{U}} \quad (1.3.47)$$

Multiplicando numerador y denominador de la parte derecha de la Ecuación (1.3.47), y reagrupando términos:

$$\frac{\bar{h}_c}{c_p \rho \bar{U}} \frac{D_H \mu k}{D_H \mu k} = \left(\frac{\bar{h}_c D_H}{k}\right) \left(\frac{k}{c_p \mu}\right) \left(\frac{\mu}{\bar{U} D_H \rho}\right) = \left(\frac{\overline{Nu}}{Re Pr}\right) = \bar{St} \quad (1.3.48)$$



Para la parte izquierda, empleando las Ecuaciones (1.3.14) y:

$$C_f = \frac{\tau_s}{\rho \bar{U}^2 / 2 g_c} \quad (1.3. 49)$$

Se tiene que

$$\tau_s = f \frac{\rho \bar{U}^2}{8} \quad (1.3. 50)$$

Y modificando la Ecuación:

$$\bar{St} = \frac{\bar{Nu}}{Re Pr} = \frac{f}{8} \quad (1.3. 51)$$

Siendo ésta la *analogía de Reynolds* para fluidos con $Pr \approx 1$.

Siguiendo con esta suposición, y empleando la expresión empírica:

$$f = 0,184 Re_D^{-0,2} \quad (1.3. 52)$$

En la Ecuación (1.3.51):

$$\bar{St} = 0,023 Re_D^{-0,2} \quad (1.3. 53)$$

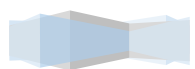
Y siendo $Pr=1$:

$$\bar{Nu} = 0,023 Re_D^{-0,2} \quad (1.3. 54)$$

Se cumple que:

$$\bar{h}_c = 0,023 \bar{U}^{0,8} D^{-0,2} k \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{0,8} \quad (1.3. 55)$$

De esta expresión se deduce que emplear tubos de pequeño diámetro y altas velocidades dan lugar a coeficientes de transferencia de calor elevados, aunque esto conduce a una potencia de bombeo requerida elevada. Es por lo tanto crucial el obtener un punto óptimo entre ambos criterios.



➤ CONVECCIÓN FORZADA MEJORADA.

La necesidad de aumentar la eficacia y eficiencia de los intercambiadores de calor ha dado lugar a la aparición de técnicas de mejora de la transferencia de calor, divididas en técnicas pasivas y activas.

El objetivo de la convección forzada es incrementar la potencia calorífica q_c :

$$q_c = h_c A \Delta T \quad (1.3. 56)$$

Para una ΔT fija, se puede aumentar q_c si lo hacen h_c o A ; aunque esto produce un aumento de pérdidas por fricción.

Para tal objetivo, se han diseñado diversas técnicas, entre ellas la modificación de la geometría o superficie de intercambio, el empleo de elementos insertados.

En capítulos posteriores se hará referencia a alguna de estas técnicas de mejora.



1.3.1.2 CONVECCIÓN MIXTA.

En este documento se realizará una breve introducción al concepto de convección mixta, situación habitual en los colectores solares planos.

➤ EFECTOS DE FLOTACIÓN.

En tubos horizontales, la dirección de la corriente de convección es transversal al vector de la aceleración gravitatoria. En procesos de calentamiento, tiene lugar la aparición de un gradiente de densidad causado por la mayor temperatura en el exterior del tubo. Esto provoca que el fluido en contacto con la pared ascienda por la pared del tubo hasta la generatriz superior del mismo, debido a que este fluido está más caliente que el que se encuentra en el interior del tubo. Al producirse este fenómeno simétricamente, el fluido alojado en la parte superior se desplaza hacia la generatriz inferior del tubo, por la parte central del mismo. Puesto que, además de esta circulación de fluido, éste se desplaza a lo largo del tubo, la superposición de ambos flujos determina una trayectoria en espiral a lo largo del tubo, como se indica en la Figura 8.

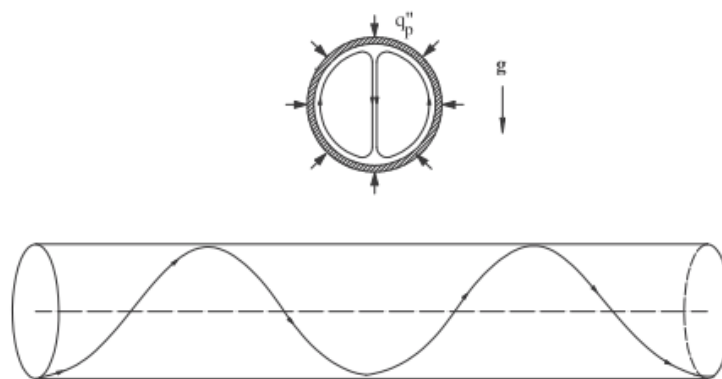
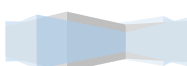


Figura 8: Perfiles de flujo en convección mixta: recirculaciones simétricas en una sección transversal y trayectoria en espiral a lo largo del tubo.

Debido a estas corrientes, el coeficiente de transmisión de calor en la parte inferior del tubo es mayor que en la parte superior, por lo que además de variar a lo largo del tubo, sección a sección, varía dentro de cada una de las secciones.



Se puede estimar de esta forma $\overline{Nu_x}$ promedio en una sección concreta:

$$\overline{Nu_x} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Nu_x d\vartheta \quad (1.3. 57)$$

Siendo para el caso de calor uniforme:

$$\overline{Nu_x} = \frac{q_p'' d}{k(\bar{T}_s - T_f)} \quad (1.3. 58)$$

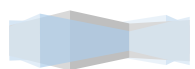
Al igual que en convección forzada, en convección mixta la condición de contorno térmica influye en gran medida en la transmisión de calor. Con una condición de flujo de calor constante, una vez desarrollado térmicamente el flujo, la diferencia de temperatura entre pared y fluido es constante, por lo que los efectos de convección serán constantes en todo el tubo. En caso de temperatura de pared constante, el flujo secundario desaparecerá a medida que la temperatura del fluido se aproxima a la de la pared.

➤ DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA.

Como se ha observado, en cualquier fenómeno de transferencia de calor se producen cambios en la densidad en el fluido, y si existe convección natural, aparecen las corrientes internas indicadas anteriormente dentro del tubo a lo largo de la pared. En el caso de que los efectos de la convección forzada sean elevados, estas circulaciones naturales pueden ser despreciables; y de igual manera, si el fenómeno de convección natural es muy elevado, los efectos de la convección forzada no se tienen en cuenta. Por tanto, es necesario determinar cuándo predomina un tipo de convección sobre otro, y cuándo poseen el mismo orden de magnitud.

Para obtener una indicación de la magnitud relativa de los efectos de la convección natural y forzada, se empleará la ecuación de Navier-Stokes, incluyendo en la misma los efectos de la convección natural:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g\beta(T - t_\infty) \quad (1.3. 59)$$



Donde, empleando

$$X = x/L$$

$$Y = y/L$$

$$\theta = (T - T_{\infty})/(T_0 - T_{\infty})$$

$$P = (p - p_{\infty})/(\rho U_{\infty}^2/2g)$$

$$U = u/U_{\infty} \text{ y } V = v/U_{\infty}$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial X} + \left(\frac{\mu}{\rho U_{\infty} L} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \left[\frac{g\beta L^3 (T_0 - T_{\infty})}{v^2} \right] \frac{v^2}{U_{\infty}^2 L^2} \theta \quad (1.3. 60)$$

Cerca de la superficie, en la capa límite, el lado izquierdo de la ecuación es del orden de la unidad, mientras que los dos primeros términos de la derecha también son del mismo orden. De esta forma, los efectos de flotación influenciarán al perfil de velocidades, de la cual depende a su vez la distribución de temperaturas si $\theta \cong 1$; y en ese caso se tiene la expresión:

$$\frac{g\beta L^3 (T_0 - T_{\infty})}{(U_{\infty} L/v)^2} = \frac{Gr_L}{Re_L^2} \cong 1 \quad (1.3. 61)$$

La relación $\frac{Gr_L}{Re_L^2}$, conocida como el número de Richardson Ri, indica la importancia relativa de los efectos de flotación frente a los efectos de convección forzada.

Si es mucho menor que la unidad, entonces se tiene un problema de convección forzada pura. Para valores mucho mayores que la unidad, los términos de flotación son dominantes y se tiene un problema de convección natural pura o convección libre. Entre estos dos límites, el problema es de convección mixta, donde los efectos de convección natural y forzada tienen una magnitud semejante. De esta forma, no se puede despreciar el efecto de la convección forzada en un proceso de convección natural y viceversa.

➤ PARÁMETROS ADIMENSIONALES.

Los parámetros adimensionales a tener en cuenta en convección mixta son:

✓ Grashof

✓ Prandtl

✓ Reynolds

✓ Eckert



Como se ha podido observar en el apartado anterior, el número de Grashof, combinado con el de Reynolds, es importante a la hora de conocer la importancia de la convección natural o forzada. Su expresión varía según la condición de contorno aplicada. Así:

$$\text{Flujo calor uniforme } Gr_q = \frac{g\beta d^4 q''}{v^2 k} \quad (1.3. 62)$$

$$\text{Temperatura de pared uniforme } Gr_T = \frac{g\beta d^3 (T_s - T_f)}{v^2} \quad (1.3. 63)$$

Por otro lado, el número de Eckert sólo es importante en fluidos con alta velocidad y es por ello despreciable en flujos laminares, donde las velocidades son normalmente bajas. Por tanto el término viscoso de disipación de energía se puede despreciar normalmente.

Puesto que Nu es el coeficiente de transferencia de calor adimensionalizado, fácilmente se deduce que depende de los parámetros de movimiento, posición y geometría del fluido:

$$Nu_x = Nu_x(Re, Pr, Gr, x^*) \quad (1.3. 64)$$

Donde x^* es la distancia adimensional:

$$x^* = \frac{x}{d} \frac{1}{RePr} \quad (1.3. 65)$$

➤ CORRELACIONES DE CONVECCIÓN MIXTA PARA FLUJO DE CALOR UNIFORME.

Dentro de las distintas correlaciones para obtener el valor de Nusselt local en caso de flujo de calor uniforme en tubo liso, se encuentra la de Petukhov y Polyakov. Esta correlación tiene en cuenta tanto el efecto de la convección forzada como el de la convección natural. Para una sección dada:

$$\overline{Nu}_z = Nu_{z,cf} \left[1 + \left(\frac{Ra_q}{B} \right)^4 \right]^{0,045} \quad (1.3. 66)$$

$$Nu_{z,cf} = 4,36 + 1,31(x^*)^{-1/3} \exp(-13\sqrt{x^*}) \quad (1.3. 67)$$



$$B = \begin{cases} 5 \cdot 10^3 (x^*)^{-1} & \text{si } x^* < 1,7 \cdot 10^{-3} \\ 1,8 \cdot 10^4 + 55(x^*)^{-1,7} & \text{si } x^* > 1,7 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad (1.3. 68)$$

➤ CONVECCIÓN MIXTA EN LA PRÁCTICA.

Cabe destacar que, cuando las fuerzas de flotación poseen la misma dirección que las fuerzas externas, tales como las fuerzas gravitacionales en flujo ascendente, se incrementa la transferencia de calor. De igual forma, cuando se encuentran en direcciones contrarias, se reduce la transferencia de calor.

En la Figura 9 se recoge gráficamente dicha relación, incluyendo el parámetro $GrPr \frac{D}{L}$. En la zona sombreada oscura dentro de la zona de convección mixta, la contribución de la convección natural es inferior al 10%; y en la zona más clara es la forzada la que es inferior al 10 %. En la zona no sombreada, la convección natural y forzada están en el mismo orden de magnitud.

En la práctica, los efectos de la convección natural en flujo turbulento son insignificantes. En el caso de duda ante el tipo de convección presente en el flujo, el coeficiente de transferencia de calor se obtiene a partir del valor de cada uno de los modelos de convección, tomando como referencia el de valor más elevado. La precisión de esta estimación es del 25 %.

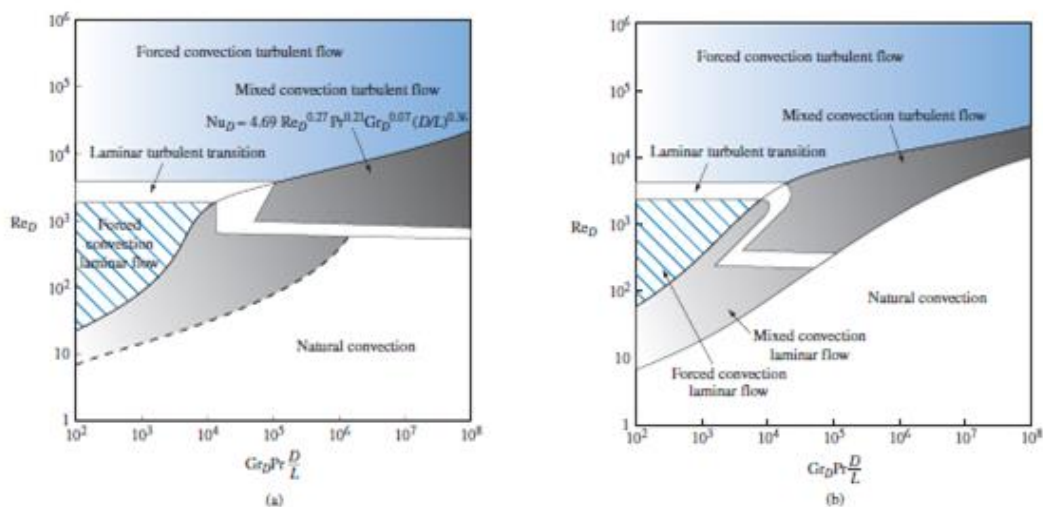


Figura 9 : Convección forzada, natural y mixta para flujo en tubos horizontales (a) y verticales (b).



1.3.2 COLECTORES SOLARES.

Un colector solar es un tipo de intercambiador de calor que transforma la energía procedente de la radiación solar en calor, transmitiendo el mismo a un fluido de trabajo circulante, que aumenta su temperatura, para un posterior aprovechamiento.

Actualmente se pueden diferenciar dos tipos principales de captadores en el mercado:

- Los captadores planos o de placa plana.
- Los captadores de concentración de la radiación: cilíndricos, parabólicos, de tubos de vacío o de CPC, que incorporan reflectores concentradores.

Nos centraremos en los colectores solares planos por ser estos el objeto de nuestro estudio. Estos colectores actúan como un receptor que recoge la energía procedente del Sol, calentando una placa absorbidora, que calienta a su vez el fluido, es decir, transforman la energía solar en energía térmica. Se utilizan en aplicaciones en las que se requiere que la energía se libere a temperaturas bajas, como en la edificación, el sector terciario, etc. Su temperatura de operación no suele pasar de los 100°C.

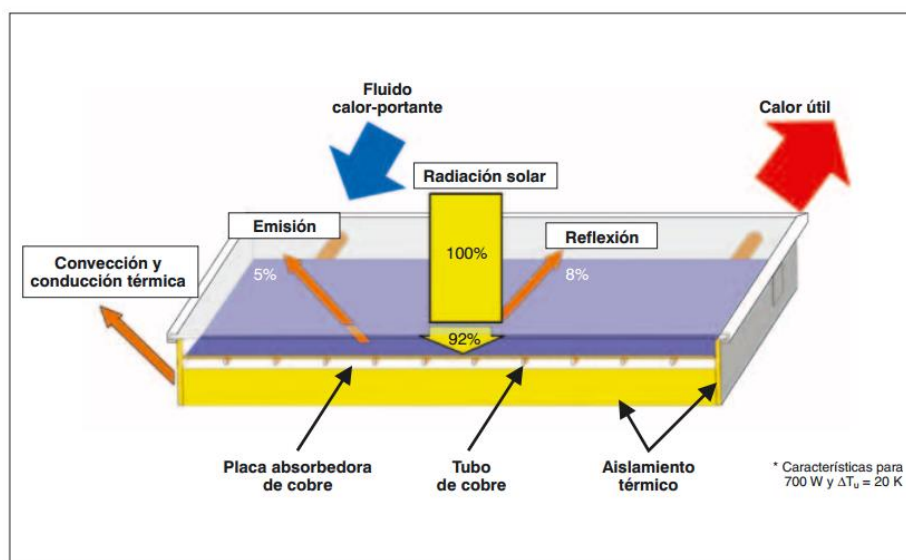
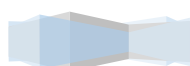


Figura 10: Esquema básico de funcionamiento de un colector solar plano.



1.3.2.1 COMPONENTES DE UN COLECTOR SOLAR PLANO.

Los colectores solares de captación directa constan de los siguientes elementos principales: cubierta, placa absorbente o absorbedor, aislamiento térmico y carcasa.

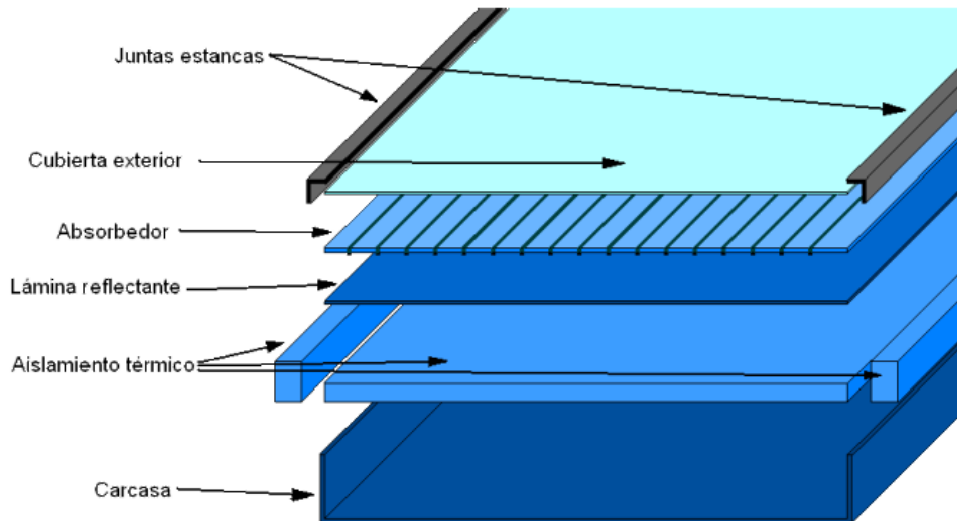


Figura 11: Partes de un colector solar plano.

Cubierta exterior.

Su misión es provocar el efecto invernadero reduciendo al mismo tiempo las pérdidas por convección aumentando de este modo el rendimiento y asegurar la estanqueidad del colector al agua y al aire, en unión con la carcasa y las juntas.

El hecho de dotar a los colectores de una cubierta transparente aumenta la eficiencia de la conversión térmica de la energía solar. El efecto invernadero provocado por la cubierta impide que la radiación emitida por el absorbedor cuando se calienta se pierda al exterior. La intensidad de este efecto dependerá de las características del material utilizado en la cubierta. Por otro lado el uso de una cubierta transparente aumenta la eficiencia por la protección que ésta da al absorbedor, aislándolo del medio ambiente y evitando la acción del viento.

La cubierta no ha de mantener la suciedad adherida a la superficie exterior, asegurando un lavado eficaz con la lluvia y que no sea precisa la limpieza manual. Debe asegurarse



también una buena fijación a la carcasa y una resistencia mecánica que soporte condiciones climatológicas adversas

Por ello las cualidades físicas que debe tener una cubierta operativa son:

- Alto coeficiente de transmisión de la radiación solar en la banda de 0,3 y 3 μ m y que este coeficiente no se degrade con el paso de los años.
- Bajo coeficiente de transmisión para las ondas largas de modo que la radiación procedente del absorbedor se refleje y retorne de nuevo a este.
- Bajo coeficiente de conductividad térmica que dificulte el paso de calor desde la superficie interior hacia el exterior.
- Alto coeficiente de reflexión para la longitud de onda larga de la radiación emitida por la placa captadora.
- Coeficiente de dilatación pequeño ya que la cara interior estará siempre más caliente que la exterior y por tanto se dilatará más.

Los materiales más utilizados en su elaboración son:

- ✓ Vidrio, en sus numerosas variedades.
- ✓ Materiales plásticos.

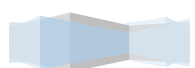
Además, la cubierta suele ser tratada, para mejorar sus prestaciones, mediante tratamientos anti-reflectantes sobre la superficie exterior o interior de la cubierta.

Placa absorbente.

La placa absorbente o absorbedor es el elemento fundamental del captador. Es empleado para recibir la energía radiante y cederla al fluido caloportante que lo atraviesa en forma de calor.

La estructura del absorbedor puede tener un mayor o menor grado de complejidad que determinará también su rendimiento. Existen distintos modelos, entre ellos:

- Dos placas metálicas de cobre separadas por unos milímetros, entre las cuales circula el fluido caloportador.



- Placa metálica de cobre sobre la cual están soldados o embutidos los tubos por los que circula el fluido caloportador. En lugar de una placa metálica se puede dotar de unas aletas de cobre a los tubos de cobre.
- Dos láminas de metal de cobre unidas a gran presión excepto en los lugares que forman el circuito del fluido calo portador, los cuales han sido abombados mediante insuflación de aire.
- Láminas de plástico.

Las características e indicaciones de la placa absorbadora son las siguientes:

- Los tratamientos de la superficie mediante pinturas son más económicos que los tratamientos selectivos pero tienen menos duración.
- Si la instalación va a funcionar mediante termosifón las pérdidas de carga no deben ser superiores a 3mm.c.a por m² de superficie de captación, para que la circulación sea la adecuada y no se produzcan grandes saltos térmicos.
- No se debe mezclar el cobre y el acero, para evitar la corrosión de este último.
- El fluido caloportador que circula por la placa debe tener un reparto de temperaturas equilibrado, es decir, el campo de temperaturas debe ser lo más homogéneo posible.
- En los paneles con doble placa, la transmisión de calor es directa, no ocurriendo lo mismo para los que poseen los tubos soldados o embutidos. En este último caso la transferencia de calor va a depender de: la conductividad de la placa, la separación, diámetro y espesor de los tubos, el rendimiento y régimen del flujo (laminar, transición o turbulento) y de la buena ejecución de las soldaduras o de los acoplamientos a presión.
- Las entradas y salidas del fluido deben ser suaves de manera que las pérdidas locales sean bajas y que las soldaduras no estén forzadas para impedir posibles fugas.
- Se deben calorifugar bien las entradas y salidas para evitar pérdidas importantes debido a la creación de puentes térmicos entre la placa y los elementos no aislados.
- Debe ser capaz de soportar la presión interna del fluido incluso en condiciones extremas.
- Se deben instalar elementos de filtrado adecuados para evitar obstrucciones.



Los materiales más utilizados en su fabricación son acero, acero inoxidable, aluminio y cobre. Es conveniente que la cara del absorbedor esté recubierta de un revestimiento especialmente elegido para absorber bien los rayos solares. Para esta finalidad se utilizan pinturas y superficies selectivas caracterizadas por bajos coeficientes de emisividad y absorptividad. Las pinturas negras absorben bien la radiación solar pero tienen un coeficiente de emisión elevado sobre todo a temperaturas elevadas. Para mejorar la emisividad se emplean materiales que respondan bien a esta propiedad. Se suelen emplear superposiciones de varias capas de materiales o tratamientos especiales de superficies. Es importante que la transmisión de calor al fluido se realice de forma homogénea a lo largo del recorrido a través del absorbedor con lo que se conseguirá un mayor rendimiento.

Aislamiento térmico.

Es el recubrimiento en todos los lados del panel, excepto en la parte acristalada, que evita pérdidas térmicas. Los aislantes deben poseer una serie de características especiales que aumenten su efectividad, podemos destacar:

- Resistir altas temperaturas sin deteriorarse, lo que muchas veces se consigue colocando entre la placa y el aislante una capa reflectante, que impida que el aislante reciba directamente la radiación.
- No desprender vapores al descomponerse por el calor y en caso de ocurrir que no se adhieran a la cubierta.
- No degradarse por el envejecimiento u otro fenómeno a la temperatura habitual de trabajo.
- Soportar la humedad que se pueda producir en el interior de los paneles sin perder sus cualidades.
- Poseer un espesor de entre 40 y 70mm.

Los materiales más empleados con este propósito son la lana de vidrio y la mineral, la espuma rígida de poliuretano y el poliestireno expandido.



Carcasa.

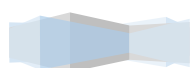
Su misión es tanto de soporte como de protección de los elementos, y debe servir como enlace entre el elemento y los anclajes necesarios para fijarlo a los edificios o estructuras en que se ubique. Es la que alberga a todos los componentes (cubierta exterior, placa absorbente, aislamiento) y es generalmente de aluminio o de fibra de vidrio, por su poco peso y aguante a la corrosión. Por tanto propiedades importantes son

- Rigidez y resistencia estructural que asegure la estabilidad. Es de suma importancia ya que debe resistir las cargas de viento.
- Resistencia de los elementos de fijación mecánica para los esfuerzos a transmitir.
- Resistencia química a la corrosión y a los efectos corrosivos de la atmósfera y a la inestabilidad química debido a las inclemencias del tiempo, ya que deben estar a la intemperie.
- Aireación del interior del colector para evitar la condensación del agua.
- Evitar toda geometría que permita la acumulación de agua, hielo o nieve en el exterior del colector.
- Permitir un fácil desmontaje de la cubierta para poder tener acceso a la placa captadora.

1.3.2.2 CONEXIÓN DE CAPTADORES.

Por lo que respecta al campo de captación de una instalación solar térmica, el aspecto más importante a definir después de su superficie, es el tipo de agrupación de captadores para poder dimensionar parámetros básicos como el caudal, el diámetro de las tuberías, los soportes, etc...

Existen dos opciones o tipologías básicas para agrupar dos o más captadores, en serie y en paralelo. Además, se puede configurar un campo de captación combinando las dos agrupaciones, denominándose circuitos mixtos.



➤ CONEXIÓN EN SERIE.

En la conexión en serie, la salida del primer colector se conecta directamente con la entrada del siguiente, y así sucesivamente. La temperatura del fluido de entrada en cada colector es superior a la del captador precedente, de forma que a la salida de la batería o grupo de captadores podemos obtener temperaturas más altas que si trabajásemos con el salto térmico de un solo captador.

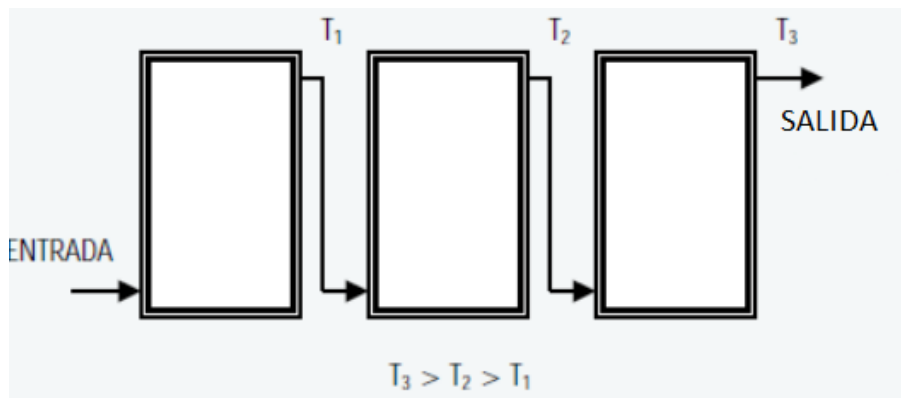
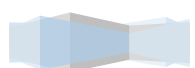


Figura 12: Conexión en serie de captadores.

Este tipo de conexión presenta un inconveniente: el rendimiento de los colectores va disminuyendo proporcionalmente con el aumento de la temperatura de trabajo. Por tanto, esta tipología de conexionado no se acostumbra a utilizar, únicamente se utiliza en aplicaciones muy particulares y en ningún caso se deben de conectar más de 3 captadores en serie, según dicta la ITE 10.1 del RITE.

➤ CONEXIÓN EN PARALELO.

En la conexión en paralelo, tanto la salida como la entrada de los captadores están conectadas a puntos de entrada y salida comunes al resto de captadores. Con esta configuración, la temperatura del fluido de entrada y salida es la misma en todos los captadores, de forma que en la salida del grupo de captadores se obtiene la temperatura como si se trabajase con el salto térmico de un solo captador. Por tanto, todos los captadores trabajan en el mismo punto de la curva de rendimiento.



La conexión en paralelo es la más habitual en las instalaciones solares térmicas, ya que es la más eficiente y rentable. De hecho, la conexión en paralelo es la indicada según la ITE 10.1.3 del RITE.

En las figuras 13 y 14 se puede apreciar las diferencias básicas en el conexionado de módulos que integran una batería de captadores conectados en paralelo.

- Cuando los captadores utilizados solo disponen de dos vías, una de entrada y otra de salida, la conexión en paralelo obliga a montar dos tuberías auxiliares, una de ida y otra de retorno, a las que se conectan los captadores. Esta tipología comporta la utilización de más accesorios y más mano de obra, por el contrario, es una tipología que permite ajustar los captadores lateralmente, hecho que permite una mejor integración, siempre que se dé una solución eficaz al recorrido de las tuberías auxiliares.

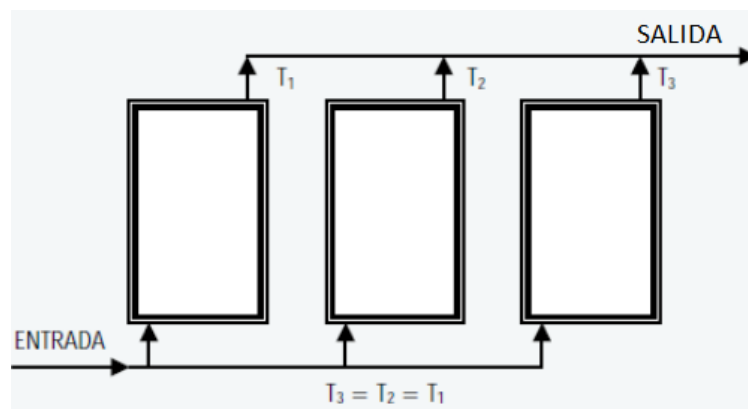
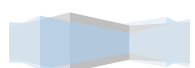


Figura 13: Conexión en paralelo con captadores de 2 vías.

- Los captadores de 4 vías laterales, dos en cada banda, permiten la conexión en paralelo aprovechando elementos internos del propio captador como tubería de distribución del fluido caloportador. Esta opción ahorra materiales y tiempo de ejecución de la instalación, hecho que lleva a la mayoría de fabricantes a utilizar esta tipología de captadores.



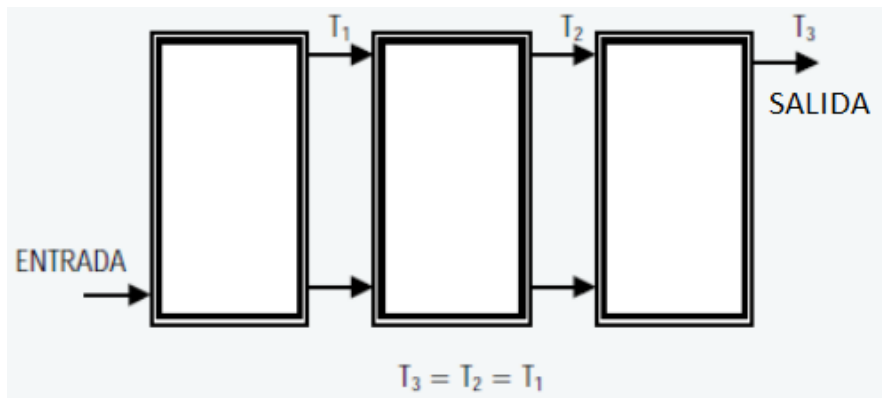


Figura 14: Conexión en paralelo con captadores de 4 vías.

➤ CONEXIÓN MIXTA DE CAPTADORES.

En algunas ocasiones, el volumen de los captadores y/o la necesidad de temperaturas más elevadas dan como resultado instalaciones que combinan la disposición en serie y en paralelo. Esta tipología se denomina mixta.

El RITE especifica que las instalaciones mixtas pueden estar formadas por:

- Conexión en paralelo de baterías formadas por un máximo de 3 captadores conectados en serie.
- Conexión de un máximo de 3 baterías en serie formadas por captadores en paralelo.

➤ CONSIDERACIONES COMUNES.

Independientemente de la solución adoptada con respecto a la configuración del campo de captadores, existe una serie de consideraciones a tener en cuenta para distribuirlos en baterías y conectarlos entre sí.

- La disposición de los captadores debe facilitar las operaciones de reparación y mantenimiento, como también el desmontaje fácil para posibles sustituciones.
- La longitud de las tuberías debe ser la más corta posible para evitar pérdidas de carga y de calor.
- Se debe evitar la formación de bolsas de aire en el circuito, por eso, en los tramos de tuberías horizontales se dejará como mínimo pendiente del 1% y se evitará producir el efecto sifón, tal y como establece el RITE.



- El campo de colectores deberá tener equilibrada la pérdida de carga entre las diferentes baterías de colectores de forma que el caudal circulante sea similar entre ellos.

➤ EQUILIBRADO DEL CAMPO DE CAPTACIÓN.

Básicamente existen dos metodologías para conseguir equilibrar el caudal del fluido caloportador en un campo de captadores:

- Igualando la longitud de los circuitos. Esto se consigue con el denominado retorno invertido, es decir, igualando la longitud de tubería de conexión de todos los captadores con tal de que el fluido tenga la misma pérdida de carga.

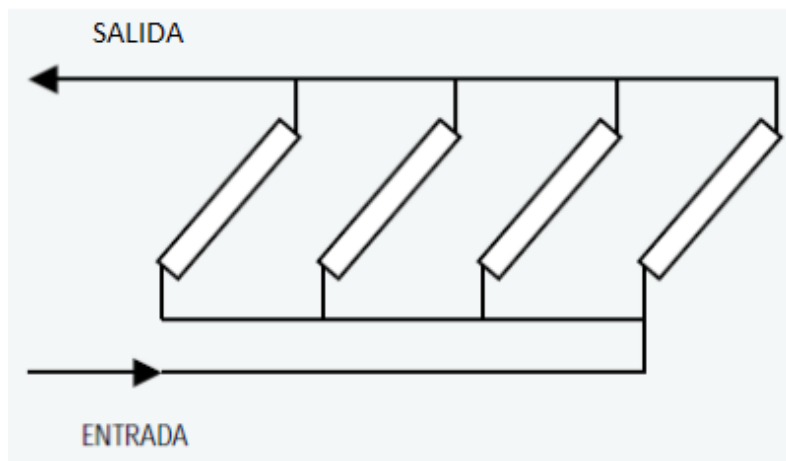


Figura 15: Campo de captadores con retorno invertido.

- Insertando pérdidas de carga mediante la disposición de válvulas de equilibrado a la entrada de las baterías de captadores. Así, a menor longitud de circuito se le aplica más pérdida de carga con la válvula correspondiente.

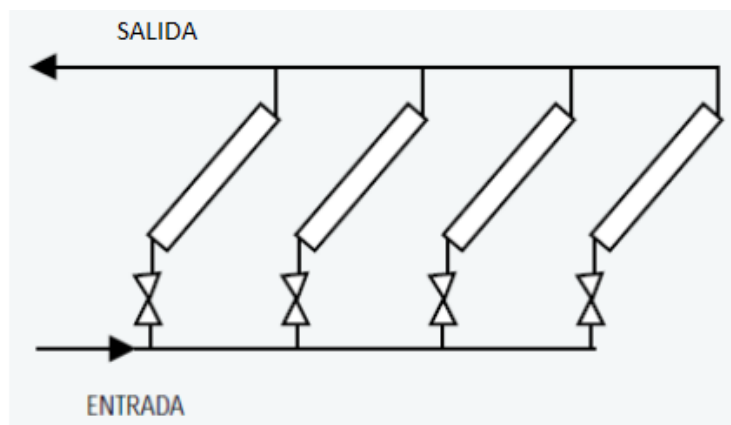
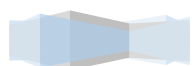


Figura 16: Campo de captadores con válvulas de equilibrado.



1.3.2.3 ASPECTOS IMPORTANTES EN UN COLECTOR SOLAR.

➤ VALORES CARACTERISTICOS DEL CAPTADOR.

Capacidad térmica.

Se determina en los ensayos, según UNE EN 12975, y es una medida de inercia térmica y por lo tanto de la rapidez de respuesta del captador durante el calentamiento y enfriamiento.

Pérdida de carga.

También se determina en el ensayo par diferentes caudales, normalmente se realiza con agua, por lo que los valores obtenidos han de ajustarse a los fluidos que se suelen emplear en el circuito primario.

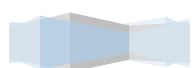
Temperatura de estancamiento.

Se denomina así a la temperatura máxima del colector, sin que circule el fluido del circuito primario, a una determinada irradiación y temperatura ambiente. La temperatura de estancamiento supone un problema que puede incidir en la vida útil del captados, mantener la temperatura constante entre 90° y 110°C mediante disipadores de calor estáticos incorporados al captador es la mejor solución para asegurar una vida útil y un funcionamiento seguro de la instalación.

➤ ÁREAS CARACTERÍSTICAS DE UN COLECTOR PLANO.

En la siguiente figura podemos ver las áreas características de un colector solar plano, y el significado de cada una de ellas.

Área total, AG: es el área máxima proyectada por el captador completo. Se trata del área entre los límites exteriores del captador, generalmente los bordes externos de la carcasa del mismo.



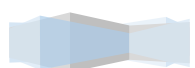
Área de apertura, A_a : se trata del área proyectada máxima a través de la cual penetra la radiación solar sin concentrar en el captador. Es la de la superficie visible o abierta del captador para la radiación solar. Por lo general coincide con el área de la cubierta transparente visible (sin contar la junta).

Área del absorbedor, A_A : se trata del área máxima de proyección del absorbedor. En los captadores solares planos es la suma de las áreas de las aletas y de las tuberías internas de distribución expuestas a la radiación. El área “activa” del absorbedor coincide generalmente con el área del absorbedor.

➤ EL FLUIDO CALOPORTADOR.

El fluido caloportador pasa a través del absorbedor y transfiere a la parte del sistema de aprovechamiento térmico (acumulador o interacumulador) la energía. Los tipos más usados son el agua y la mezcla de anticongelante, pueden ser también aceites de silicona o líquidos orgánicos sintéticos. Los anticongelantes son glicoles y los más usados son el etilenglicol y el propilaglicol. Las características fundamentales de los anticongelantes son:

- **Son tóxicos.** Debido a que llevan una sustancia que se conoce como inhibidores de la corrosión que es beneficioso para los dispositivos de la instalación. Se debe impedir que se mezcle con el agua de consumo (haciendo la presión del secundario mayor que la del primario, por prevención ante una posible rotura del intercambiador).
- **Son muy viscosos.** Al ser más espesos le cuesta al líquido más avanzar, aumentando la pérdida de carga, factor a tener en cuenta a la hora de elegir la electrobomba que suele ser de mayor potencia.
- **Dilata más que el agua cuando se calienta.** Para evitar las sobrepresiones se utiliza el vaso de expansión. Si se diseña el vaso como para que aguante una presión como si fuese sólo agua, la membrana del vaso llega un punto en el que no da más de sí y se produciría la sobrepresión en el circuito.
- **Es inestable a más de 120°C.** Si alcanzase más de esta temperatura, se degrada convirtiéndose en un ácido muy corrosivo que afectaría a la vida de los



elementos de la instalación. Además pierde sus propiedades por lo que deja de evitar la congelación. Los hay que aguantan más temperatura pero son más caros.

- **La temperatura de ebullición disminuye a la del agua.** Podría verse como una ventaja porque significa que absorbe más energía.
- **El calor específico disminuye al del agua.** Por absorber más energía, tarda también más en perderla o entregarla, por lo que la ventaja anterior se anula al no transferir todo el calor que ha ganado.

Para calcular la cantidad de anticongelante que hay que añadir a una instalación, primeramente hay que consultar en la tabla de temperaturas históricas cuál es la mínima temperatura registrada en esa ciudad. Una vez que se conoce se va a la gráfica de los glicoles que suministra el fabricante y se traslada el valor para indicarnos cuál es el porcentaje.

1.3.2.4 ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN DE LOS COLECTORES.

La orientación de los colectores determina la cantidad de radiación solar aprovechable. Esta cantidad es maximizada orientando los colectores hacia el norte geográfico.

El norte geográfico está ubicado 4° a la derecha del norte magnético. Dado que la altura solar varía durante el año, la inclinación óptima del colector también varía. Esto se puede apreciar en la Figura 17.

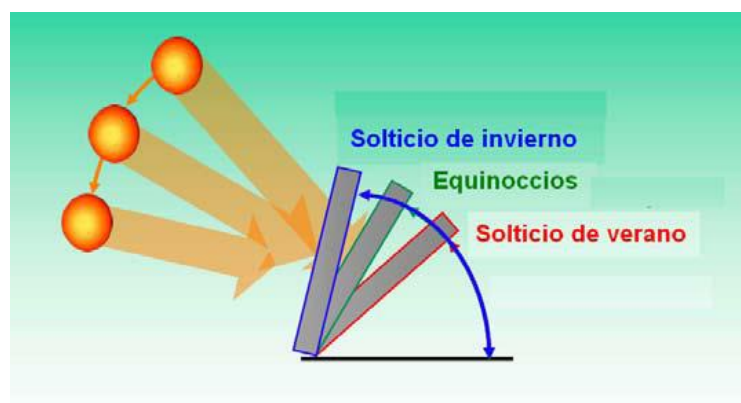


Figura 17: Orientación e inclinación de un colector según la época del año.



En caso de no poder variar la inclinación de los colectores durante el año, se prefiere utilizar una inclinación equivalente a la latitud del lugar donde se instalan.

1.3.3 MODELO MATEMÁTICO DE UN COLECTOR SOLAR PLANO.

1.3.3.1 BALANCE DE POTENCIA.

El comportamiento de un colector solar puede determinarse mediante una expresión que relaciona la potencia útil, \dot{Q} , la potencia absorbida por el colector, S , y las pérdidas térmicas y ópticas en el colector.

La potencia absorbida S , es la radiación absorbida por el colector. Las pérdidas térmicas de los alrededores se deben a las radiaciones infrarrojas, y a fenómenos de transmisión de calor como la convección y conducción térmica. Estas pérdidas dependen del coeficiente global de transmisión de calor, U_L , con el que se evalúa el calor intercambiado con el medio; de la temperatura ambiente, T_a , y de la temperatura media del absorbedor, T_{abs} .

La expresión que relaciona dichas variables es:

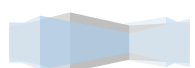
$$\dot{Q} = A_{abs}[S - U_L(\bar{T}_{abs} - T_a)] \quad (1.3. 69)$$

Donde

$$S = G(\tau_g \alpha_{abs}) \quad (1.3. 70)$$

Siendo G la radiación global. Ésta se descompone en dos radiaciones, una directa y otra difusa. La absorción de la radiación incidente está ligada a la fracción de la radiación incidente que llega por la cubierta transparente τ_g , y la fracción de radiación incidente absorbida por el absorbedor α_{abs} .

Sin embargo, poder conocer el valor de la temperatura en el absorbedor es bastante dificultoso ya que depende del diseño del colector, la radiación solar incidente, y las condiciones del fluido que circula por dentro.



Por ello, en el estudio de los colectores solares se introduce un término, denominado factor de remoción del calor FR, para obtener una expresión con datos más asequibles llegando a la expresión final:

$$\dot{Q} = A_{abs} F_R [G(\tau_g \alpha_{abs}) - U_L(T_{in} - T_a)] \quad (1.3. 71)$$

1.3.3.2 EFICIENCIA TÉRMICA.

El parámetro básico que caracteriza al colector solar es su eficiencia, que es la relación entre la energía térmica útil retirada del colector y la energía solar incidente. Esta dependerá del proyecto del colector, tiempo de operación y de factores externos tales como: condiciones meteorológicas y disposición del colector en relación a la tierra.

El rendimiento del colector viene dado por

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{A \cdot I_g} \quad (1.3. 72)$$

Donde:

A Área de captación del colector.

I_g Radiación global incidente.

Al realizar el balance térmico del colector, se llega a la siguiente expresión del rendimiento

$$\eta = F' \cdot \tau \alpha - F' \cdot U_L \frac{T_{in} - T_a}{I_g} \quad (1.3. 73)$$

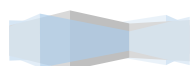
Donde:

$F' \cdot \tau \alpha$ Factor óptico

$F' \cdot U_L$ Factor de remoción de calor

$(T_{in} - T_a) / I_g$ Temperatura reducida.

Para un mismo colector, la curva de rendimiento es válida para el caudal con el cual se realiza el ensayo. Al disminuir el caudal en el colector solar, la transferencia de calor entre el fluido y la placa del colector solar empeora y la curva de rendimiento se desplaza



a la izquierda de forma paralela. Se tendrá el mismo rendimiento para un ΔT menor, o con el mismo ΔT un rendimiento menor.

1.3.3.3 RENDIMIENTO.

En cuanto al rendimiento de los captadores, resulta difícil precisar qué cantidad de energía se podrá obtener en cada momento, puesto que este tipo de captadores de baja temperatura carecen de cualquier forma de seguimiento de la posición del Sol, y captan tanto la radiación directa como la difusa con resultados muy variables. En líneas generales, la eficiencia de los captadores solares vendrá definida por su curva de rendimiento, que permite saber cuál es la cantidad de energía que podremos aprovechar en cada situación.

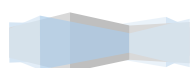
El rendimiento de un captador es la relación entre la energía útil aportada por el fluido caloportador y la energía solar incidente sobre la cubierta del mismo. El parámetro que lo define es la ecuación de rendimiento que aporta el fabricante, cuyos términos vienen en función del material con el que está construido y su comportamiento frente a la radiación solar incidente.

(1.3. 74)

$$\eta = \eta_0 - \alpha_0 \frac{T_i - T_a}{I} - \alpha_1 \frac{(T_i - T_a)^2}{I}$$

Donde,

η	<i>Rendimiento o eficiencia del captador.</i> Expresa que porción de la luz incidente es convertida en calor útil por el colector.
T_i	<i>Temperatura del fluido caloportador (K).</i>
T_a	<i>Temperatura ambiente (K).</i>
I	<i>Intensidad de radiación (W/m²).</i> Expresa la potencia por unidad de superficie de la luz incidente.
η_0	<i>Rendimiento máximo o eficiencia óptica.</i> Se consigue si la temperatura del fluido caloportador (T_i) es igual a la temperatura ambiente (T_a), o bien para radiaciones incidentes muy elevadas



- α_0 *Coeficiente de pérdida térmica lineal (W/m²K). Describe las pérdidas térmicas lineales, del colector, referidas a la superficie y a la diferencia de temperaturas.*
- α_1 *Coeficiente de pérdida térmica cuadrático (W/m²K²). Expresa la curvatura de la curva del rendimiento total, sin considerar las pérdidas térmicas lineales debidas a la radiación.*

1.3.3.4 DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL COLECTOR.

Para poder apreciar la distribución de la temperatura en un colector, es necesario apoyarse en la Figura 18 y la Figura 19.

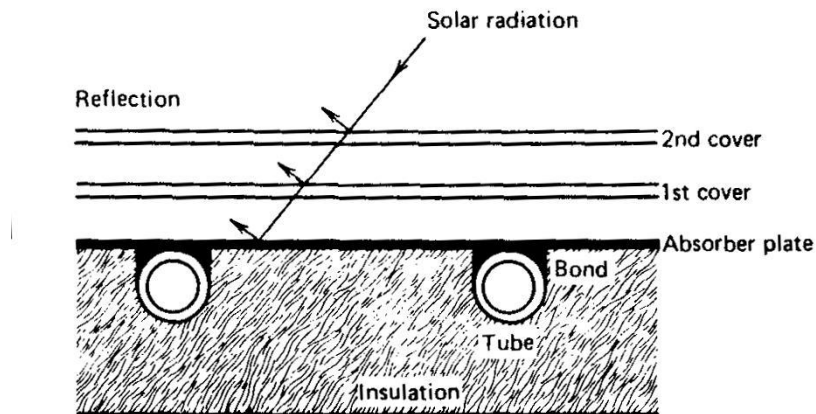


Figura 18: Esquema de un colector solar plano.

El funcionamiento de un colector se basa en el flujo de calor procedente de la radiación solar absorbida hacia los tubos por el que circula un fluido caloportador. De esta manera, el paso de energía al tubo genera un gradiente de temperaturas en el absorbedor en el sentido del flujo del fluido. En la Figura 18 se observa la radiación incidente sobre el colector entre dos tubos; y en la Figura 19 se aprecia cómo varía la distribución de temperaturas. Según las coordenadas descritas en la a), en b) se muestra la distribución de temperaturas tridimensionalmente, en c) cómo evoluciona a lo largo de la sección transversal; y en d), la evolución a lo largo de la longitud axial del absorbedor.



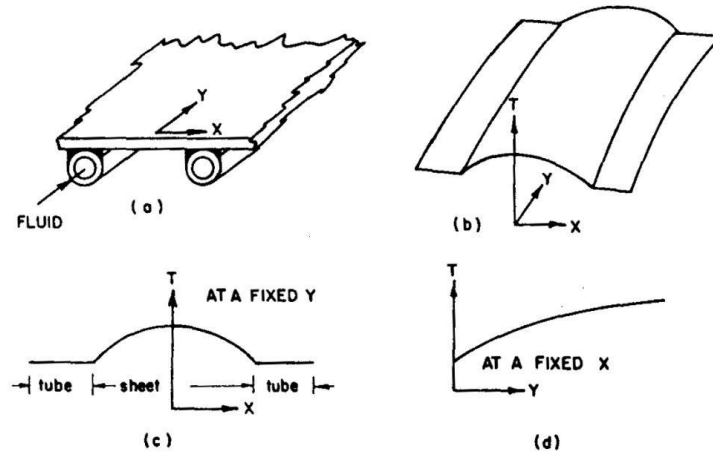


Figura 19: Distribución de las temperaturas en un absorbedor plano.

1.3.3.5 PRODUCTO TRANSMITANCIA-ABSORTANCIA.

Este producto relaciona la radiación total absorbida con la radiación total incidente, expresándose de la forma:

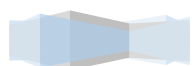
$$(\tau_g \alpha_{abs}) = \frac{G_b (\tau_g \alpha_{abs})_b + G_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) (\tau_g \alpha_{abs})_s + \rho_g G_h \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) (\tau_g \alpha_{abs})_h}{G} \quad (1.3.75)$$

El producto global se obtiene a partir del número de cubiertas transparentes N , el índice de refracción de la cubierta N_G , el ángulo de incidencia θ , el producto del espesor de la cubierta y la longitud de extinción característica X_{KL} y la absortancia del colector α_{abs} .

1.3.3.6 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS DE CALOR DEL COLECTOR.

Las pérdidas térmicas del sistema se deben a:

- Fenómenos de radiación: tiene lugar en el absorbedor debido a su temperatura.
- Fenómenos de convección: en estos las pérdidas se producen entre la cubierta transparente y el absorbedor, pudiendo minimizarse reduciendo el espacio entre ellos.
- Fenómenos de conducción: que provocan pérdidas en los laterales y la parte trasera del colector.



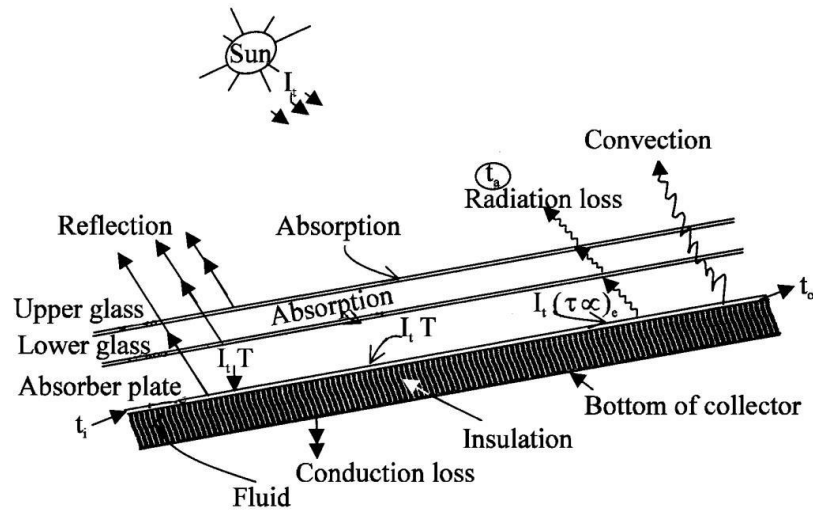


Figura 20: Esquema de pérdidas de calor en un colector solar.

Las pérdidas entre la cubierta transparente y el ambiente son causadas por radiación y convección, afectados por la velocidad del viento, la tierra, las condiciones de los alrededores y las radiaciones. El coeficiente global de pérdidas es la suma de los coeficientes de pérdidas en la parte de arriba, de abajo y de los laterales del colector:

$$U_L = U_T + U_B + U_E \quad (1.3. 76)$$

Las pérdidas en los laterales, si el diseño del colector es óptimo, son despreciables, pues en relación con la parte superior y la inferior es bastante pequeña. Se suele agrupar con el coeficiente de la parte trasera. Éste viene dado por la conductividad térmica y el espesor del aislante utilizado:

$$U_B = \frac{k_{ais}}{\delta_{ais}} \quad (1.3. 77)$$

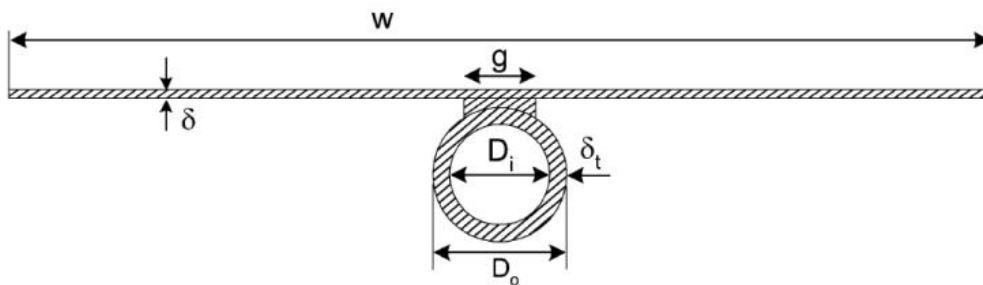
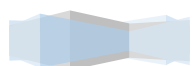


Figura 21: Geometría del tubo y la aleta de un absorbedor.



El coeficiente de pérdidas para la parte superior del colector es mucho más complejo pues tiene en cuenta los fenómenos anteriormente descritos acerca de las pérdidas de calor. Klein, en 1957, obtuvo esta expresión para dicho coeficiente:

$$U_T = \left[\frac{N_G}{\frac{C}{T_{abs}} \left(\frac{|\overline{T_{abs}} - T_a|}{N_G + f_w} \right)^e + \frac{1}{h_w}} \right]^{-1} \quad (1.3. 78)$$

$$+ \frac{\sigma (\overline{T_{abs}}^2 + T_a^2) (\overline{T_{abs}} + T_a)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs} + 0,00591 N_G h_w} + \frac{2 N_G + f_w - 1 + 0,133 \varepsilon_{abs}}{\varepsilon_g}} \quad (1.3. 79)$$

$$h_w = 5,7 + 3,8u$$

$$f_w = (1 + 0,089 h_w - 0,1166 h_w \varepsilon_{abs})(1 + 0,07866 N_G) \quad (1.3. 80)$$

$$e = 0,43 \left(1 - \frac{100}{\overline{T_{abs}}} \right) \quad (1.3. 81)$$

$$C = 520(1 - 0,000051 \beta^2) \quad (1.3. 82)$$

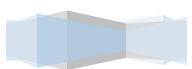
Donde u corresponde a la velocidad del viento.

1.3.3.7 FACTOR DE EFICIENCIA DE LAS ALETAS Y DEL COLECTOR.

En la Figura 21 se recogen los parámetros geométricos característicos de un tubo una aleta de un absorbedor, donde w es la longitud de la aleta, o espacio entre dos tubos, g es la longitud transversal de la soldadura entre el absorbedor y el tubo, es el espesor de la placa absorbidora, t es el espesor del tubo, y ambas D los diámetros externo e interno del tubo.

Para poder conocer la distribución de temperaturas entre dos tubos es necesario considerar despreciable el gradiente de temperatura en la dirección del flujo. Tras realizar todo el cálculo diferencial para el estudio del gradiente de temperaturas, obtenemos una expresión para conocer el calor recogido por un tubo a ambos lados por unidad de longitud es:

$$q_{aleta} = (w - g)F[S - U_L(T_{abs} - T_a)] \quad (1.3. 83)$$



Donde F es la eficiencia de la aleta:

$$F = \frac{\tanh\left(M \frac{w-g}{2}\right)}{M \frac{w-g}{2}} \quad (1.3. 84)$$

$$M = \left[\frac{U_L}{k_{abs} \delta_{abs}} \right]^{1/2} \quad (1.3. 85)$$

De manera análoga, el calor obtenido en la zona de contacto entre la aleta y el tubo por unidad de longitud se expresa:

$$q_{contacto} = g[S - U_L(T_{abs} - T_a)] \quad (1.3. 86)$$

De forma que el calor total aportado al tubo es

$$q = q_{aleta} + q_{contacto} \quad (1.3. 87)$$

$$q = wF'[S - U_L(T_f - T_a)] \quad (1.3. 88)$$

Donde F' es el factor de eficiencia del colector, definido como:

$$F' = \frac{1/U_L}{w \left[\frac{1}{U_L \left(g + (w-g)F + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi d_i h_f} \right)} \right]} \quad (1.3. 89)$$

El parámetro del denominador, haciendo una analogía con las leyes de Kirchoff, se trataría de las “resistencias térmicas” por las que ha de circular la radiación solar hasta alcanzar el fluido.

1.3.3.8 FACTOR DE REMOCIÓN DEL CALOR.

La relación entre el calor útil del colector y el calor útil que poseería si la superficie completa del absorbedor estuviese a la temperatura del fluido de entrada se denomina factor de remoción de calor. Su expresión se obtiene a partir de la Ecuación (1.3.88). Esta ecuación ofrece el calor por longitud de colector, así que para definir el calor en todo su conjunto, es necesario realizar una integral a lo largo del colector. Para ello, además de la Ecuación (1.3.88) contamos con que el balance de potencia para un fluido de trabajo desde la entrada a la salida del tubo es:



$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad (1.3. 90)$$

Dicho balance, en un elemento diferencial de longitud, es de la forma

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \\ \dot{Q} &= \dot{m}c_p \frac{dT_f}{dz} \end{aligned} \quad (1.3. 91)$$

Igualando dicha expresión a la Ecuación_:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \\ \dot{m}c_p \frac{dT_f}{dz} &= wF'[S - U_L(T_f - T_a)] \end{aligned} \quad (1.3. 92)$$

Donde, integrando desde ($z = 0, T_f = T_{in}$) hasta ($z = L, T_f = T_{out}$), se obtiene:

$$\frac{T_{out} - (T_a + S/U_L)}{T_{in} - (T_a + S/U_L)} = \exp\left(-\frac{U_L F' A_{abs}}{\dot{m}c_p}\right) \quad (1.3. 93)$$

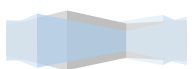
De forma que relacionando las Ecuaciones (0.3) y (0.21), se puede despejar el factor de remoción quedando así:

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{A_{abs}U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{U_L F' A_{abs}}{\dot{m}c_p}\right) \right] \quad (1.3. 94)$$

De esta manera, se pueden obtener las temperaturas de salida y de absorbedor:

$$T_{out} = \frac{A_{abs}F_R[G(\tau_g\alpha_{abs}) - U_L(T_{in} - T_a)]}{\dot{m}c_p} + T_{in} \quad (1.3. 95)$$

$$T_{abs} = T_{in} + \frac{\dot{Q}}{A_{abs}F_RU_L}(1 - F_R) \quad (1.3. 96)$$



1.3.3.9 CORRELACIONES: TRANSFERENCIA DE CALOR EN TUBO.

La transferencia de calor se estudia principalmente a partir del número de Nusselt y éste depende de una serie de números adimensionales según el tipo de flujo. Destacan el número de Prandtl, el de Reynolds, el de Rayleigh y la distancia adimensional.

El número de Nusselt expresa la relación entre el calor transferido por convección a través del fluido y el que se transferiría si sólo existiese conducción. Es función del coeficiente de transferencia de calor del fluido h_f , en W/m²K; el diámetro del tubo D_i , en m; y de la conductividad térmica del fluido k_f , en W/mK.

$$Nu = \frac{h_f D_i}{k_f} \quad (1.3. 97)$$

El número de Prandtl depende exclusivamente de las propiedades físicas del fluido, siendo μ la viscosidad dinámica del fluido, en kg/sm; c_p el calor específico del fluido, en J/kgK; y k_f la conductividad térmica del fluido en las paredes, en W/mK. Relaciona la velocidad de difusión viscosa y la velocidad de difusión térmica.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k_f} \quad (1.3. 98)$$

El número de Reynolds representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. Es función de la viscosidad dinámica μ , en kg/sm; el flujo másico del fluido \dot{m} , en kg/s; y el diámetro interior del tubo D_i , en m.

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D_i \mu} \quad (1.3. 99)$$

El número de Rayleigh indica si la transferencia de calor tiene lugar por conducción o convección, en función de si se supera un valor umbral.

$$Ra = \frac{g \rho^2 c_p \beta D^4 q''}{\mu k^2} \quad (1.3. 100)$$



La distancia adimensional x^* de una sección z con respecto al inicio de la zona de ensayo térmico, se emplea para observar los efectos de la región de entrada. Se caracteriza por la expresión:

$$x^* = \frac{z}{d} \frac{1}{RePr} \quad (1.3. 101)$$

En régimen laminar la transmisión de calor puede estar determinada por los efectos de flotación debidos a gradientes térmicos en el fluido. Esto tiene como efecto la creación de corrientes secundarias en el fluido que benefician la transmisión de calor en un proceso de calentamiento (que más tarde se analizarán). Para evaluar en qué medida la transmisión de calor está influenciada por la convección natural, se cuenta con el número de Richardson $Ri = Gr/Re^2$ que se trata del ratio entre las fuerzas de flotación (evaluadas por el número de Grashof Gr), y las fuerzas convectivas evaluadas por el número de Reynolds.



1.4 TRANSFERENCIA DEL CALOR MEJORADA.

El estudio de la transferencia de calor mejorada se denomina en la literatura anglosajona “*heat transfer enhancement, augmentation o intensification*”. Esto significa incrementar el coeficiente de transferencia de calor teniendo presente el posible aumento de la pérdida de presión y la potencia de bombeo. La ecuación básica para el calor transferido se escribe como sigue:

$$\dot{q} = \bar{h}A\Delta T_m \quad (1.4. 1)$$

Donde \dot{q} es el calor total intercambiado, \bar{h} el coeficiente global de transferencia de calor, A es el área de intercambio y ΔT_m es la diferencia de temperatura logarítmica media entre los dos fluidos implicados.

Se busca aumentar el coeficiente de transferencia \bar{h} de la ecuación para conseguir alguno de estos objetivos:

- ✓ Obtención de elevados flujos de calor.
- ✓ Reducción del tamaño de los equipos.
- ✓ Aumento de la eficiencia del proceso.

El estudio de las técnicas de mejora de la transferencia térmica es considerado hoy en día como una rama más de la transmisión de calor. Es un campo de estudio con entidad propia, que presenta unas características multidisciplinarias entre la mecánica de fluidos y la transmisión de calor: la física del problema está relacionada con las mecánica del flujo, mientras que el interés práctico del estudio es el de mejorar la transferencia térmica de los intercambiadores.

No obstante, el empleo de las técnicas de mejora lleva asociada una penalización debida a las pérdidas por fricción intrínsecas a las mismas. Por tanto, para obtener una mejora no sólo en la transferencia de calor, sino global en el sistema, ha de optimizarse el empleo de las técnicas para hallar una situación intermedia entre la maximización del calor obtenido y las pérdidas por fricción.

Decidir la conveniencia de utilizar o no una técnica de mejora es una decisión compleja porque intervienen muchos factores en la toma de decisión. Existen multitud de



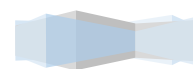
soluciones para mejorar la transferencia de calor de un intercambiador de tubos lisos; sin embargo, la ventaja energética derivada de utilizar una técnica concreta debe ponderarse respecto al posible incremento de coste y al beneficio económico previsto durante su funcionamiento en planta.

Puede afirmarse que las técnicas de mejora económicamente viables para mejorar la transferencia de calor en el lado tubo de intercambiadores de carcasa y tubo son las superficies rugosas y los dispositivos insertados.

Entre los tubos con rugosidad integral destacan aquellos en los que la rugosidad se forma por deformación en frío de la pared de un tubo liso. Están indicados principalmente para flujo turbulento al perturbar la subcapa límite térmica cercana a la pared. Se usan en multitud de aplicaciones prácticas tanto en flujo monofásico como bifásico, incluyendo evaporadores inundados y condensadores de sistemas de refrigeración e intercambiadores de calor para procesos de esterilización de fluidos orgánicos. Su facilidad constructiva y su bajo coste han permitido su comercialización extendida tanto en grandes equipos a medida como fabricados en serie y ofertados en catálogo.

Los elementos insertados representan una aproximación temprana a la mejora de la transferencia de calor en el lado tubo, que permite el uso de un tubo liso. Existe un amplio catálogo de elementos insertados: cualquier dispositivo insertado en el flujo producirá un incremento de la velocidad y por tanto un aumento en la transferencia de calor. Estudios anteriores sobre elementos insertados incluyen estos cinco dispositivos:

- **Láminas en espiral (lámina alabeada / twisted tape).** Las láminas guían el flujo provocando un giro en espiral a lo largo de la longitud del tubo. Como por lo general no existe un buen contacto térmico entre la pared interior del tubo y las láminas, éstas no actúan como aletas.
- **Elementos insertados de superficie extendida.** Se trata de formas extruidas insertadas en el tubo. Como existe un buen contacto térmico entre la pared y el elemento, éste actúa como una superficie extendida al mismo tiempo que reduce el diámetro hidráulico.
- **Muelles rígidos.** Consisten en un alambre enrollado en espiral, que funciona dentro del tubo como una rugosidad no-integral.



- **Mallados de alambre o cepillos (tipo HiTran).** Son alambres enrollados de manera más o menos aleatoria. Se consigue así un elemento con una alta densidad de material, destinado a perturbar una fracción grande del flujo.
- **Elementos insertados desplazados.** No están en contacto directo con las paredes del tubo y producen un mezclado periódico del grueso del flujo.



Figura 22: Ejemplo de tres tipos de dispositivos insertados.

En flujo turbulento es más efectivo mezclar el flujo en la capa límite viscosa en la pared del tubo que mezclar el grueso del flujo utilizando alguno de los elementos citados anteriormente. Esto se debe a que la resistencia térmica dominante está muy próxima a la pared. Aquí, los tubos deformados serán por lo general más efectivos. En cualquier caso, no se puede descartar el uso de algún elemento insertado ya que éstos tienen una ventaja comparativa: pueden implementarse en un intercambiador de tubos lisos ya existente sin necesidad de reemplazarlo.

En el flujo laminar en un tubo liso, las partículas fluidas siguen líneas longitudinales, únicamente existe intercambio de energía por transporte molecular, y la resistencia térmica ocupa todo el tubo. Para mejorar la transferencia de calor resulta interesante introducir cualquier dispositivo que aumente el transporte de masa, cantidad de movimiento y energía entre la región de la capa límite y el grueso del flujo. El uso de elementos insertados está indicado ya que éstos mezclan el grueso del flujo. En cualquier caso, debe tenerse en cuenta que estos elementos tienen como mayor desventaja los aumentos considerables de pérdida de presión que producen.

Entre los diferentes dispositivos insertados los más empleados son: las láminas en espiral, los muelles rígidos y los mallados de alambre. Estos últimos se han probado efectivos en el tratamiento de fluidos muy viscosos, pero tienen problemas de ensuciamiento.



Las láminas en espiral y los muelles rígidos, aparecen como competidores directos. Las láminas en espiral han sido estudiadas ampliamente hasta la fecha, y existen correlaciones de diseño para las regiones laminar, de transición y turbulenta. El alto grado de conocimiento de estos dispositivos ha hecho de las láminas en espiral el dispositivo insertado estándar. No obstante, esto no significa que sean el mejor dispositivo, tal y como apunta Webb y Kim [2005]. El uso de muelles rígidos está muy poco extendido, sobre todo en régimen laminar. Pese a que estos elementos potencialmente tienen interés en régimen laminar, se han realizado muy pocos estudios hasta la fecha, y los que hay son francamente deficientes. La transferencia de conocimientos a la industria ha sido prácticamente nula, traduciéndose en un recelo a su uso por simple desconocimiento.

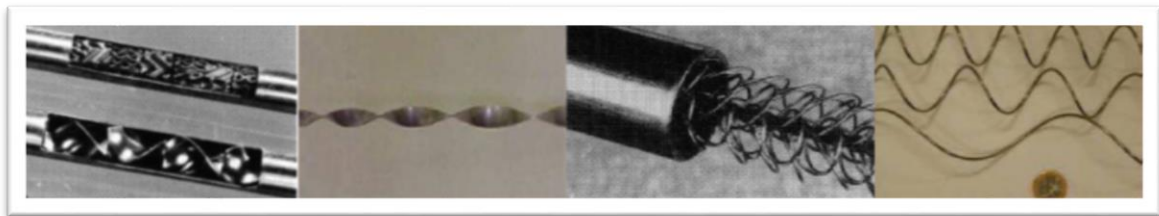


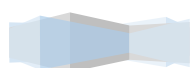
Figura 23: Dispositivos insertados para tubo liso: Superficie extendida, lámina en espiral, mallado de alambre y muelles en espiral.

1.4.1 ELEMENTOS INSERTADOS.

De las cinco categorías de elementos insertados enumeradas en la sección anterior, los muelles son los únicos que no promueven un mezclado del grueso del flujo.

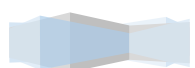
Se ha considerado que los muelles son una técnica no adecuada para régimen laminar; esto ha provocado que los estudios han sido escasos tanto en régimen laminar, donde han cedido protagonismo a las láminas en espiral.

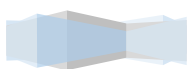
La práctica totalidad de los trabajos realizados sobre estos dispositivos son puramente experimentales, en donde se presentan resultados de pérdida de presión adimensionalizados en forma de factor de fricción de Fanning y resultados de transmisión de calor en forma de número de Nusselt. No se han encontrado, al menos en la literatura abierta, modelizaciones numéricas del flujo en muelles.



En régimen turbulento, las rugosidades de tipo integral han sido mucho más estudiadas. Muchos de los estudios de muelles en flujo turbulento se han realizado utilizando los muelles como simuladores de rugosidades integrales. Esta condición fronteriza de los muelles les da muchas ventajas respecto a otras alternativas.

Un muelle en espiral se fabrica abrazando un rollo de alambre de espesor dado a una varilla cilíndrica. Se debe de fabricar con un diámetro exterior ligeramente mayor que el diámetro interior del tubo donde se piensa utilizar, de este modo se asegura que el muelle permanecerá fijo al insertarlo y se evita así la erosión de las paredes interiores del tubo. El muelle insertado en el tubo forma una rugosidad helicoidal definida por el diámetro interior del tubo d , el diámetro de alambre e y el paso de hélice p . Una alternativa de instalación consiste en dejar un huelgo entre el muelle y la pared interior del tubo. Esta última configuración se usa menos, porque es más difícil de instalar y puede presentar problemas de vibraciones y de erosión de la pared del tubo.





2. INSTRUMENTACIÓN.

2.1. INSTRUMENTACIÓN.

2.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.3. PROTOCOLO DE ENSAYO.





La instalación constará de dos partes bien diferenciadas que denominaremos Circuito Principal y Circuito Secundario. Además, tendremos una tercera parte fuera de la instalación en sí, que será la sala de control de la instalación.



Figura 25: Instalación del circuito principal.

2.1.1 CIRCUITO PRINCIPAL. (CP).

El Circuito Principal (CP) estará compuesto por:

- Captador solar: Captador que lleva la particularidad dentro del captador. Se trata de un pequeño muelle introducido por dentro del captador para conseguir, así, una mayor superficie de transferencia de calor.
- Bomba hidráulica de CP.
- Caudalímetros.
- Válvula de expansión.
- Válvulas de control de caudal motorizadas.
- Resistencias de inmersión.
- RTD'S.
- Caudalímetros de turbina.



2.1.2 CIRCUITO SECUNDARIO. (CS).

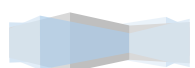
Hemos denominado Circuito Secundario (CS) al sistema de refrigeración que lleva incorporada la instalación. En el tendremos:

- Tanque de CS.
- Intercambiador de placas.
- Máquina de refrigeración.

2.1.3 INSTALACIÓN HIDRÁULICA.

Las instalaciones hidráulicas tienen como misión transmitir energía por medio de un líquido a presión, basándose en la incompresibilidad del mismo. Los elementos que la componen permiten el transporte y regulación del fluido caloportador a través de los tubos del colector solar.

En el subsistema de la instalación se puede dividir además en tres partes: un grupo de abastecimiento, donde se encontraría la bomba y el depósito; un sistema de mando o regulación formado por las válvulas distribuidoras, válvulas de caudal y reguladores; y un grupo de trabajo al que pertenecerían el intercambiador, la máquina frigorífica y los paneles solares.



2.1.4 INTERCAMBIADOR DE CALOR.

Un intercambiador de calor es un equipo de transferencia de calor cuya función es cambiar la entalpía de una corriente. Transfiere calor entre dos o más corrientes de proceso a diferentes temperaturas, que estén separados por una barrera o que se encuentren en contacto. Son parte esencial de los dispositivos de calefacción, refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesamiento químico.

De acuerdo al proceso de transferencia el intercambiador utilizado es un intercambiador de contacto indirecto, es decir, las corrientes permanecen separadas y la transferencia de calor se realiza a través de una pared divisora, o desde el interior hacia el exterior de la pared de una forma no continua. En el caso que nos ocupa existe una transferencia de calor entre el fluido procedente de la máquina térmica y el procedente de los tubos del colector ya calentado. Se trata de bajar la temperatura de salida del colector para conseguir la temperatura de entrada deseada.

De acuerdo al tipo de construcción se trata de un intercambiador de placas o PHE (Plate Heat Exchanger) que es aquel en el que las dos corrientes de fluido están separadas por placas, que no son más que láminas delgadas rectangulares, en las que se observa un diseño corrugado, formado por un proceso de prensado de precisión. A un lado de cada placa, se localiza una empacadura que bordea todo su perímetro. La unidad completa mantiene unidos a un cierto número de estas placas, sujetas cara a cara en un marco. El canal de flujo es el espacio que se forma gracias a las empacaduras, entre dos placas adyacentes, arreglando el sistema de tal forma, que los fluidos fríos y calientes corren alternadamente por dichos canales, paralelamente al lado más largo. Existen aberturas en las cuatro esquinas de las placas que conjuntamente, con un arreglo apropiado en las empacaduras, dirigen a las dos corrientes en sus canales de flujo.

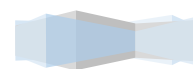




Figura 26: Intercambiador de calor de placas
2C2 CIPRIANI.

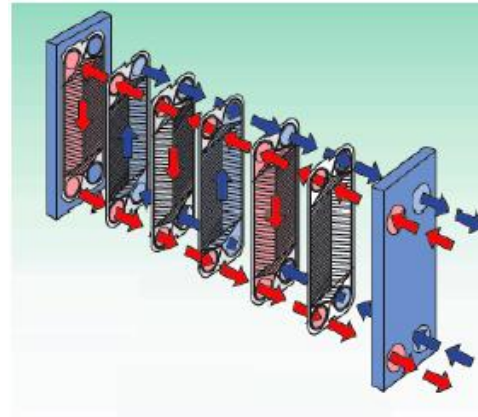


Figura 27: Esquema intercambiador de calor de
placas que indica la dirección del flujo caliente
y frío

Es un intercambiador de la marca CIPRIANI Scambiatori ESPAÑA, modelo 2C2 que dispone de 40 placas y puede trabajar a un máximo de 150°C y a un mínimo de -40°C.

El resto de sus características pueden verse en el anexo correspondiente.



2.1.5 DEPÓSITO.

El depósito sirve de almacenamiento para el fluido requerido por el sistema y dispone de espacio suficiente para que el aire pueda separarse del fluido, permitiendo que los contaminantes se sedimenten. Además, ayuda a disipar el calor generado por el sistema.

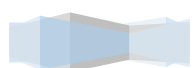
El depósito debe ser lo suficientemente grande como para facilitar el enfriamiento y la separación de contaminantes. Como mínimo debe contener todo el fluido que requiere el sistema y mantener un nivel lo suficientemente alto como para que no se produzcan torbellinos en la línea de aspiración de la bomba. En general se utilizan depósitos que tienen 2 o 3 veces la de la bomba en litros/minuto. Por ejemplo si la bomba tiene un caudal 1,5 l/min el depósito que utilizaremos será de 3 ó 4,5 l.

Encargado de llenar y presurizar el circuito de la instalación antes de cada ensayo.



Figura 28: Depósito TRE-30C SUPRA de EDESA.

El depósito utilizado es de la marca EDESA modelo TRE-30C SUPRA cuya capacidad es de 30 litros, y cuyas características pueden ser visualizadas en el Anexo.



2.1.6 MÁQUINA FRIGORÍFICA.

Una máquina frigorífica es un tipo de máquina térmica generadora que transforma algún tipo de energía, habitualmente mecánica, en energía térmica para obtener y mantener en un recinto una temperatura menor que la temperatura exterior. La energía mecánica necesaria puede ser obtenida previamente a partir de otro tipo de energía, como la energía eléctrica mediante un motor eléctrico. Esta transferencia se realiza mediante un refrigerante, que en distintas partes de la máquina sufre transformaciones de presión, temperatura y fase (líquida o gaseosa); y que es puesto en contacto térmico con los recintos para absorber calor de unas zonas y transferirlo a otras.

Por la instalación que se está tratando, según el ensayo que se lleve a cabo, va a circular agua. El fluido, al pasar por el colector, experimenta un aumento de su temperatura de hasta 40° en las condiciones más extremas de potencia de la manta. Esta temperatura es necesario disminuirla para que el fluido pueda circular por el resto del recorrido (bomba, válvulas, caudalímetros de efecto Coriolis, etc.) y volver a pasar por el colector con la temperatura de entrada constante que se desea, ya que, como se sabe, el camino que recorre el fluido por la instalación es un camino cerrado. De ahí la utilidad de la enfriadora presente.

La enfriadora se encargará de refrigerar el fluido que llega desde el colector a altas temperaturas para bajar su temperatura hasta los 15°C de temperatura de entrada con la que se ha trabajado en los ensayos.



Figura 29: Máquina frigorífica HRS050-W de SMC.



El modelo utilizado es HRS050-W de SMC que admite temperaturas de 5 a 40°C, actuando tanto como refrigerador como evaporador, tiene de 4700 a 5100W de capacidad de enfriamiento y admite de 23 a 28 l/min. El fluido refrigerante que utiliza es agua. Se puede manipular tanto manualmente como por ordenador a través de una tarjeta de relés conectada por un lado al ordenador y por otro a la máquina.



2.1.7 BOMBA HIDRÁULICA.

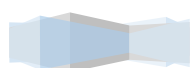
En las instalaciones hidráulicas, la generación de la presión necesaria para el accionamiento de los diferentes mecanismos la realiza una bomba hidráulica, que efectúa la conversión de la energía mecánica del motor que la acciona en energía hidráulica de presión del líquido que se bombea. Es necesario resaltar que una bomba, cualquiera que sea su tipo, no genera por sí misma presión alguna; ésta se produce en el circuito cuando el fluido encuentra resistencia a su paso.



Figura 30: Bomba TPE de Grundfos.

La bomba de la instalación es una bomba vertical en línea de la gama TPE de Grundfos. Es una bomba centrífuga en línea de una sola etapa, con motor estándar y sellos de eje mecánicos. Se trata de una bomba de acoplamiento cerrado, es decir, la bomba y el motor son unidades independientes. Por este motivo, es menos sensible a las impurezas contenidas en el líquido bombeado que las bombas encapsuladas de similares características.

Los motores de la gama TPE llevan incorporado un convertidor de frecuencia, lo que permite utilizar distintos métodos de control, en este caso a través de la aplicación web del Agilent. Igualmente, el resto de características que presenta este modelo y tipo de bomba se encuentra anexionadas al final de este proyecto.



2.1.8 VÁLVULAS AUTOMÁTICAS.

Podría definirse una válvula como un dispositivo mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos. La válvula incrementa las pérdidas hidráulicas globales en la instalación, lo cual reduce el caudal.

La válvula es uno de los instrumentos de control más esenciales en la industria. Debido a su diseño y materiales, las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos y gases, desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos. Sus tamaños van desde unos milímetros hasta los 90m o más de diámetro (aunque en tamaños grandes suelen llamarse compuertas). Pueden trabajar con presiones que van desde el vacío hasta más de 140MPa y temperaturas desde las criogénicas hasta 1100 K. En algunas instalaciones se requiere un sellado absoluto; en otras, las fugas o escurrimientos no tienen importancia.

Dentro de los distintos tipos de válvulas que se encuentran en la industria, las dos válvulas situados a continuación de la bomba en la instalación de ensayo son válvulas de control automática y también de regulación, limitadoras de caudal. En la instalación se accionan manualmente con un cierre de giro, aunque también tiene la opción de ser monitorizada a través de la aplicación web de Agilent. Tienen por tanto la función principal de regular el caudal que se le va a suministrar a los colectores.



Figura 31: Válvula automática AVM105SF132 de SAUTER.



El modelo utilizado es el AVM105SF132 fabricado por la empresa SAUTER y trabajan en un rango de temperaturas de -10 a 55°C y con una potencia de entre 2,5 y 5W. Son válvulas de tres vías aunque una de ellas está anulada porque no se precisa su uso. El resto de datos pueden verse en el anexo. (Ver anexo)

- Su ventaja para mejorar el ahorro energético: Desconexión en función del par de giro para hacer un uso eficiente de la energía.
- Áreas de aplicación: Accionamiento de válvulas de paso directo y de tres vías de las series VUN/BUN, VUD/BUD y VUE/BUE, DN15 hasta DN50. Para reguladores con salida conmutada.
- Características: Peso 0.7 kg. Longitud del cable 1.2 m. Tiempo de funcionamiento Ty 30 s, 120 s. Señal de control y 3pt, 24/230 V~. Temperatura ambiente -10...55°C. Humedad ambiente 5-95 %Rf. Esfuerzo de empuje axial 250 N en el AVM 105 y 500 N en el AVM 115. Motor síncrono con electrónica de control y desconexión. Detección electrónica de final de carrera y parada del motor mediante interruptor temporizador en el aparato. Reductor exento de mantenimiento con acoplamiento magnético. Reductor desenclavable para el posicionamiento de la válvula a mano (se adjunta llave Allen). El ensamblaje con la válvula se realiza de manera prácticamente automática.
- Descripción técnica: Caja de dos piezas de plástico autoextinguible, parte inferior negra y parte superior amarilla. Ménsula de plástico reforzado con fibra de vidrio. Tuerca de racor de latón para montaje adosado a la válvula. Cable de conexión de 1,2 m de longitud, 3x 0,75 mm². En función de la versión, el tiempo de marcha para una carrera de giro de 8 mm es de 30s o 120 s. Dirección de montaje: autoportante vertical hasta horizontal, no suspendido.



2.1.9 PANELES SOLARES.

Un captador solar, también llamado colector solar, es cualquier dispositivo diseñado para recoger la energía radiada por el sol (en el caso que nos ocupa las mantas térmicas hacen las veces de sol) y convertirla en energía térmica. Existen principalmente dos tipos de colectores solares, los captadores de baja temperatura, utilizados fundamentalmente en sistemas domésticos de calefacción y ACS, y los colectores de alta temperatura, conformados mediante espejos, y utilizados generalmente para producir vapor que mueve una turbina que generará energía eléctrica.

Los colectores sobre los que se ha ensayado pertenecen al grupo de baja temperatura, concretamente son los llamados colectores solares planos consistentes en una placa metálica. Esta placa está unida o soldada a una serie de conductos por los que fluye un caloportador (generalmente agua, glicol, o una mezcla de ambos) que se calienta a su paso por el panel.

Las medidas de los colectores reales son de 2m de longitud y 1m de anchura, a repartir entre un total de 9 conductos. Sin embargo, las medidas de cada uno de los dos colectores de los que se dispone son de 1,8m de longitud por 0,325m de anchura a repartir entre 3 conductos por los que circulará el fluido, obteniendo una superficie de ocupación por colector de 0,585m².



Figura 32: Captador solar de ensayo térmicamente aislado.



Para evitar la mayor cantidad de pérdida de calor posible y de manera secundaria proteger el colector, se ha procedido al aislamiento de ambos colectores a través de capas de armaflex y láminas de madera. Así, cada colector se encuentra situado entre cuatro capas de armaflex de 3 cm de ancho cada una, pegadas con adhesivo, dos por la cara superior y dos por la inferior, y dos láminas de madera como capas exteriores que están fijadas mediante tornillos la una a la otra consiguiendo un efecto de sándwich por prensado del conjunto completo.

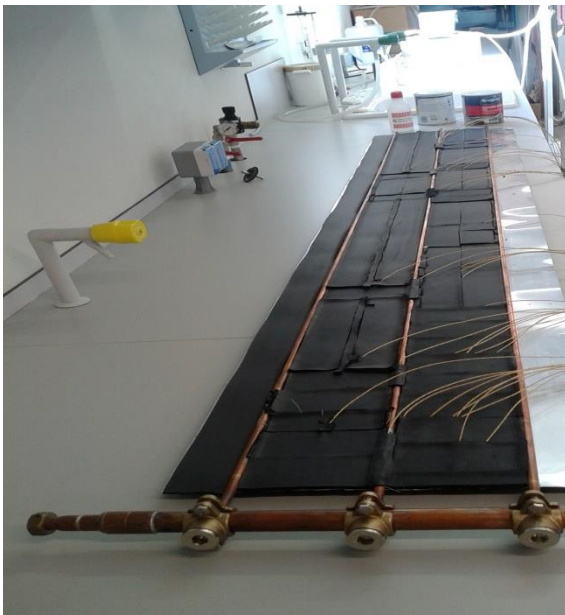
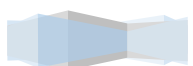


Figura 33: Disposición del armaflex a lo largo del captador.



Figura 34: Detalle de la disposición de las luterms y el armaflex

Las medidas de los armaflex son de 2m de longitud por 0,5m de ancho; las de las maderas son 2,2m por 0,6m de ancho.



2.1.10 TUBOS/TUBERÍAS.

Son tubos de 7mm de diámetro interior de cobre, material de fácil manipulación y económicamente competitivo, es resistente a la corrosión y de gran durabilidad.

Se encuentran aislados con una capa de armaflex para evitar las pérdidas de calor.



Figura 35: Detalle del tipo de tubos dentro de los captadores.



2.1.11 FLUIDOS ENSAYADOS.

El fluido de trabajo circula por el interior de los tubos del colector solar, transportando la energía hacia el depósito de acumulación, esto lo realiza indirectamente a través del intercambiador de calor.

Dado que realiza el transporte de energía del sistema solar, se busca que cumpla con ciertas propiedades, entre ellas:

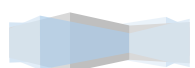
- Elevado calor específico.
- Baja Viscosidad.
- Tensión de vapor moderada.
- Baja temperatura de congelamiento.
- Alta estabilidad térmica.
- Químicamente inerte.
- No corrosivo y libre de partículas disueltas.

Las primeras 3 propiedades reducen el caudal necesario de fluido para realizar un transporte óptimo de energía desde los colectores hacia el depósito. Al tener menos caudal en el sistema, se reducen las dimensiones de la bomba de circulación y de las cañerías.

El agua cumple gran parte de los requisitos. En primer lugar, el agua pura desionizada es el mejor medio de refrigeración para sistemas cerrados siempre que la misma se mantenga por encima de la temperatura de congelación.

En la práctica, muchos sistemas industriales utilizan también el agua corriente debido a su bajo coste inicial, y, en el caso de no llevar un control estricto de la calidad del agua, resulta en la producción de numerosas averías, en algunos casos catastróficas.

Las propiedades físicas del fluido para un ensayo dado: densidad ρ , viscosidad dinámica μ , calor específico C_p , conductividad térmica k y coeficiente de dilatación térmica β , se calculan a la temperatura media del fluido en el punto donde se realiza la medida. Las propiedades físicas del agua se muestran para diferentes temperaturas en las Tablas.



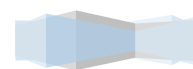
Se ha utilizado agua desionizada MUWART proporcionada por PRODUCTOS PELFRUT.

Propiedades físicas:

- Se transforma fácilmente en los tres estados de agregación (sólido, líquido y gaseoso).
- A 100°C se produce su ebullición en condiciones normales de presión (es decir, al nivel del mar a 760 mm de Hg).
- Es un compuesto con elevada capacidad calorífica, esto es, requiere mucho calor para elevar su temperatura.
- A 4°C adquiere su mayor densidad, que se considera con valor de 1, como el valor base para la densidad. Si su temperatura baja a partir de 4°C su densidad se eleva, puesto que la solubilidad decrece inversamente con la densidad; ésta es la razón por la que el hielo flota, pues ocupa más volumen.
- Es el disolvente universal por excelencia; todos los gases, así como numerosos sólidos y líquidos se disuelven en ella.
- En estado químicamente puro, es mala conductora del calor y la electricidad.
- Su densidad y fluidez permiten que su energía potencial, al ser almacenada en presas, se aproveche en las caídas de agua para producir energía eléctrica.

Propiedades químicas.

- Reacciona con los óxidos ácidos y los básicos, con los metales y los no metales, y se une en las sales formando hidratos.
- Su molécula está formada por hidrógeno y oxígeno en proporción de 1:8 en masa y de 2:1 en volumen. Su masa molecular es 18,016u.
- Su fórmula química es H_2O ; es decir, el oxígeno está unido a cada hidrógeno por medio de un enlace covalente sencillo.
- Es un compuesto muy estable; sin embargo, se ha observado que el hidrógeno y oxígeno se descomponen por encima de 1600°C.

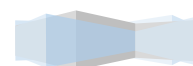


<i>Temp °C</i>	ρ <i>kg/m³</i>	<i>C_p J/kg K</i>	$\mu \times 10^3$ <i>kg/m s</i>	<i>K W/m K</i>	$\beta \times 10^3$ <i>K⁻¹</i>	<i>Pr</i> -
10	999,8	4193	1,3080	0,5820	0,082	9,42
20	998,3	4182	1,0030	0,5996	0,207	6,99
30	995,7	4180	0,7978	0,6150	0,306	5,42
40	992,3	4179	0,6531	0,6286	0,389	4,34
50	988,0	4182	0,5471	0,6405	0,462	3,57
60	983,1	4186	0,4668	0,6507	0,529	3,00
70	977,7	4191	0,4044	0,6594	0,590	2,57
80	971,6	4195	0,3550	0,6668	0,647	2,23
90	965,1	4203	0,3150	0,6727	0,702	1,97
100	958,1	4215	0,2822	0,6775	0,755	1,76

Tabla 1: Propiedades físicas del agua ensayada.

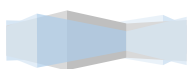
Propiedades físico-químicas.

- **Acción disolvente.** El agua es el líquido que más sustancias disuelve (disolvente universal), esta propiedad se debe a su capacidad para formar puentes de hidrógeno con otras sustancias, ya que estas se disuelven cuando interaccionan con las moléculas polares del agua.
- **Fuerza de cohesión entre sus moléculas.** Los puentes de hidrógeno mantienen a las moléculas fuertemente unidas, formando una estructura compacta que la convierte en un líquido casi incompresible.
- **Elevada fuerza de adhesión.** De nuevo los puentes de hidrógeno del agua son los responsables, al establecerse entre estos y otras moléculas polares, y es responsable, junto con la cohesión de la capilaridad.
- **Gran calor específico.** El agua absorbe grandes cantidades de calor que utiliza en romper los puentes de hidrógeno. Su temperatura desciende más lentamente que la de otros líquidos a medida que va liberando energía al enfriarse.
- **Elevado calor de vaporización.** A 20°C se precisan 540 calorías para evaporar un gramo de agua, lo que da idea de la energía necesaria para romper los puentes de hidrógeno establecidos entre las moléculas del agua líquida y, posteriormente,



para dotar a estas moléculas de la energía cinética suficiente para abandonar la fase líquida y pasar al estado de vapor.

- **Elevada constante dieléctrica.** Por tener moléculas dipolares, el agua es un gran medio disolvente de compuestos iónicos, como las sales minerales, y de compuestos covalentes polares como los glúcidos. Las moléculas de agua, al ser polares, se disponen alrededor de los grupos polares del soluto, llegando a desdoblarse los compuestos iónicos en aniones y cationes, que quedan así rodeados por moléculas de agua. Este fenómeno se llama solvatación iónica.
- **Bajo grado de ionización.** De cada 10^7 de moléculas de agua, sólo una se encuentra ionizada. Esto explica que la concentración de iones hidronio (H_3O^+) y de los iones hidroxilo (OH^-) sea muy baja. Dado los bajos niveles de H_3O^+ y de OH^- , si al agua se le añade un ácido o una base, aunque sea en poca cantidad, estos niveles varían bruscamente.



2.1.12 MANTAS TÉRMICAS.

Al estar la instalación situada dentro del laboratorio, es decir, bajo techo, no es posible hacer funcionar los colectores a través del sol. Por ello se ha buscado un sustituto que haga las veces de sol, esto es, las mantas térmicas trabajando por efecto Joule.

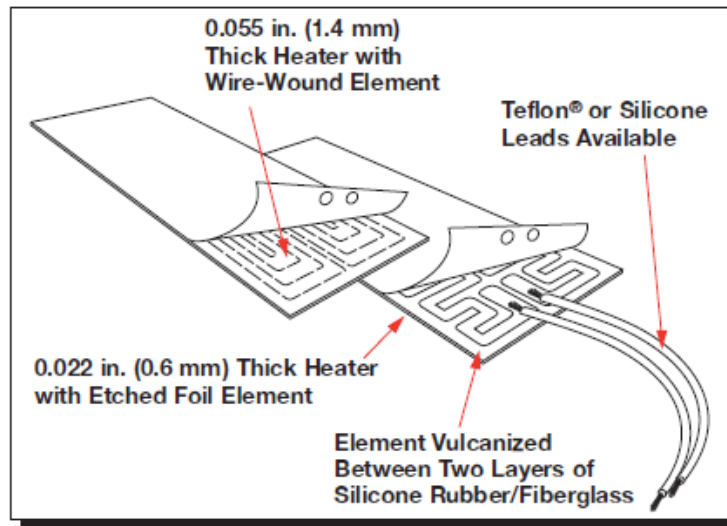


Figura 36: Esquema de los elementos y disposición que componen las mantas térmicas.

En la instalación hay dos mantas térmicas, una sobre cada colector, unidas con pasta conductora y vaselina sobre la cara superior de la lámina. Están hechas de caucho de silicona reforzadas con fibra óptica por lo que son robustas, a la vez que delgadas, ligeras y flexibles, y su principal característica es que la transferencia de calor sucede de forma rápida y eficiente, requiriendo poca potencia para ello. El modelo utilizado es Watlow que puede operar hasta temperaturas de 260°C, con densidades de potencia de hasta 12,5W/cm² regulable en función de la temperatura requerida y una resistencia constante de 27,7Ω.

Las medidas son las mismas que las de los colectores ya que han sido encargadas a fábrica para que la transferencia de calor fuera lo más efectiva posible y esto se hacía posible haciendo coincidir ambas superficies. Las medidas son por tanto, 1.8 m de longitud y 0.325m de ancho.

La potencia necesaria para calentar la manta se suministra a través de la intensidad que circula por la resistencia de ésta. En los ensayos que nos ocupan se ha trabajado con dos



potencias distintas, una de 400 y otra de 800 W/m². Es posible trabajar a diferentes potencias porque se puede ir modificando la intensidad que circula por la manta a través del torivac La conexión, posicionada en uno de los extremos del calentador, está mostrada en la figura.

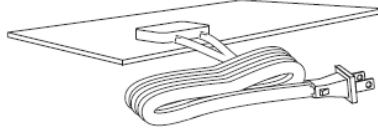


Figura 37: Esquema de la conexión a corriente de la manta térmica.

Medición de tensión con Agilent (medida en paralelo): La tensión que circula por la manta se mide directamente en una de las tarjetas conectadas al Agilent a través de una conexión por cableado, en tensión alterna y medido en paralelo pues casi despreciable, ya que la mayoría de la intensidad presente se dirige hacia la manta y se utiliza para la generación de la potencia para generar el calor necesario.



2.1.13 RESISTENCIAS TÉRMICAS DE INMERSIÓN.

Las resistencias de inmersión están diseñadas para el calentamiento en contacto directo con el fluido: agua, aceite, materiales viscosos, disoluciones ácidas o básicas, etc. Dado que todo el calor se genera dentro del líquido, se alcanza un rendimiento energético máximo. Al no existir elementos distorsionadores, el control de la temperatura de proceso puede ser muy ajustado.

Las resistencias de inmersión presentan varias opciones de acoplamiento al depósito o tanque donde se instalan: mediante tapón roscado, con racores, con brida, tipo sumergidores, etc. Se pueden utilizar resistencias para calentar cualquier tipo de fluido, desde agua hasta disoluciones corrosivas, aceites y fuel-oil muy viscosos, producción de vapor. También podemos utilizar resistencias de inmersión para trabajar en zonas clasificadas ATEX ó en procesos industriales con una presión de trabajo por encima de 40 bares.

El sistema cuenta con dos resistencias de inmersión. Las dos resistencias estarán situadas justo al inicio de los captadores. Tratarán de ajustar al máximo la temperatura deseada siguiendo la normativa UNE.

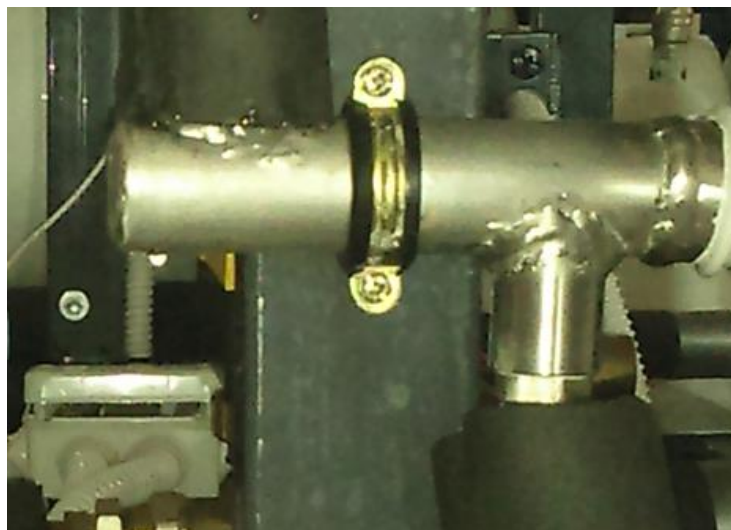


Figura 38: Resistencias de inmersión de los captadores.



Están situadas en el circuito principal, después de los caudalímetros y antes de entrar en los captadores. Cada captador tendrá el suyo, y tratará de conseguir la temperatura con una definición lo más próxima a la deseada y con los límites que permite la norma UNE, para poder hacer el ensayo. Su control se hará desde la sala de control, tanto de forma manual como de forma controlada. Su controlador estará en el cuadro eléctrico. Controlador instalado: EZ-ZONE PM.

➤ ASPECTOS GENERALES.

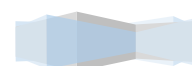
El Power Series es un modernísimo controlador de potencia de estado sólido (rectificador de silicio controlado), basado en microprocesador y diseñado para controlar calefactores industriales. El producto se basa en un paquete de varias configuraciones con capacidades monofásicas, trifásicas y multizona monofásicas. Cada configuración tiene una capacidad nominal de corriente específica, según el número de fases conmutadas. Entre las capacidades de conmutación figuran 65 a 250 Amp. Rms (eficaz) a 50°C, de 24 a 600V~, según la configuración o el número de modelo seleccionados.

Configuración monofásica.

Esta configuración puede constar de cualquiera o de todas las características de los equipos Power Series; las únicas limitaciones son las características seleccionadas por el cliente. Tiene la más alta capacidad nominal de corriente de todas las configuraciones puesto que sólo conmuta una fase de la línea de CA. Aunque está diseñada para utilizarse con calefactores resistivos, también sirve para cargas conectadas a un transformador en el modo de disparo por ángulo de fase.

Configuración trifásica, dos conexiones.

Esta configuración es aplicable para modos de disparo por cruce en cero en un calefactor resistivo estable, es decir, un elemento de cromoníquel. Usualmente se utiliza un calefactor trifásico con conexión en delta o con conexión en estrella sin puesta a tierra, y se conmutan solamente dos de las tres fases de línea V~. La tercera fase es una conexión directa a través de una barra conductora incorporada a la tarjeta del equipo Power Series,



y es controlada por las dos fases previas. Por esta razón, no se debe utilizar una configuración de dos conexiones para calefactores trifásicos con conexión en delta o con conexión en estrella con puesta a tierra; si se requiere una conexión de este tipo, consulte la sección “Configuración trifásica, tres conexiones” debajo.

Dado que esta configuración no permite disparo por ángulo de fase, no debe emplearse en calefactores de acoplamiento por transformador, ni tampoco en calefactores de resistencias menos estables tales como calefactores de carburo de silicio, disiliciuro de molibdeno, carbono grafito, o de lámparas de tungsteno; el hacerlo podría ocasionar una falla prematura del calefactor o fundido constante de los fusibles.

La configuración trifásica de dos conexiones ofrece, mediante el sistema de diagnóstico del calefactor, opciones de monitoreo de la corriente del calefactor y de los valores de kVA. No están disponibles las características de disparo por ángulo de fase, incluyendo limitación de corriente u horneado del calefactor.

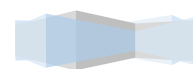
➤ MÉTODOS DE CONTROL Y CARACTERÍSTICAS.

El cruce por cero (también conocido como disparo rápido) proporciona una potencia de salida uniforme con el más bajo nivel de interferencia de radiofrecuencia (RFI). El cruce por cero es el método preferido para controlar cargas resistivas.

El controlador determina el punto en que la onda sinusoidal de CA cruza el punto de 0 voltios y después conmuta la carga, minimizando la interferencia de radiofrecuencia.

El control de cruce por cero está disponible en todas las configuraciones de los equipos Power Series.

Las funciones de arranque suave y limitación de corriente no están disponibles con el control de cruce por cero.



Página Configuración

- Entre en la página Configuración oprimiendo **■◀** por 3 segundos.
- Cuando aparezca **AL 90** / **SEt**, presione **▶** hasta que aparezca **OFF** / **AL 90**
Presione **▲▼** para seleccionar base de tiempo fijo, cruce por cero **Ft6** o base de tiempo variable, cruce por cero **Ur6b**

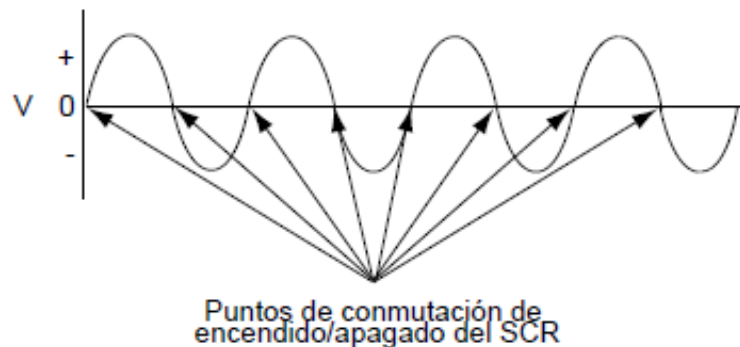


Figura 35: Conmutación de cruce por cero.

Base de tiempo fijo, cruce por cero.

En el método de control de base de tiempo fijo, la salida del nivel de porcentaje de potencia seleccionado es generada en un período de tiempo fijo (es decir, en un número fijo de ciclos), sin importar el nivel de potencia seleccionado.

La resolución de la potencia seleccionable por el usuario puede ser más precisa que la permitida por el método de base de tiempo fijo. La salida de potencia seleccionada es redondeada al próximo valor posible en ciclos completos, según sea necesario. En este método de control no se utiliza la compensación del voltaje de línea.

Contactador de CC, cruce por cero.

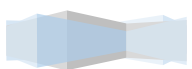
El modo de control del contactador de CC es una versión especializada del control de cruce por cero, en la cual siempre se utiliza la entrada de control analógico, y la salida de potencia en porcentaje está fija en 100 por ciento ó 0 por ciento.

Los umbrales de apagado/encendido son 2.0V/3.5V para entrada de voltaje; 5.0 mA/8.0 mA para entrada de corriente. Esto significa que la unidad está apagada para un voltaje



(corriente) de entrada de 2.0V (5.0 mA) ó menos, y 100% encendida para un voltaje (corriente) de entrada de 3.5V (8.0 mA) o mayor.

En el control de contactor de CC no se utiliza la compensación del voltaje de línea; la salida es 100 por ciento encendido o bien 100 por ciento apagado.



2.1.14 AUTOTRANSFORMADOR.

En la instalación, se necesita regular la tensión que circula por las mantas térmicas. Al ser la resistencia de la manta constante, para conseguir un aumento de su potencia es necesario un aumento de la tensión como se deduce de la ecuación $P = \frac{U^2}{R}$. En estas condiciones, se precisa de un autotransformador. El autotransformador seleccionado es de la marca TORIVAC y tiene el aspecto que muestra la Figura 36.

El TORIVAC (control de potencia) es un autotransformador variable, un elemento básico para regular una tensión alterna, variable, desde cero hasta el máximo, con una intensidad constante. Se caracteriza por su robustez mecánica y su alta resolución que permite ajustes muy precisos de tensión. Dispone de una regulación motorizada que es utilizada fundamentalmente para regular los equipos a distancia o para equipos estabilizadores. En este caso se utiliza para motorizar los variadores de tensión de grandes potencias. En este tipo de regulación el eje del variador es accionado por un motor-reductor, mediante un conmutador manual que permite elevar o reducir la tensión de salida. Las motorizaciones que ensambla **TORIVAC** carecen de inercia, por lo que son ideales para control remoto.

Tiene incorporado una placa electrónica con una precisión del 2% que permite regular el variador por medio de un potenciómetro o una señal continua de 0-10Vcc.



Figura 36: Carcasa y estructura externa del autotransformador Torivac.

Este autotransformador admite como máximo 6A de corriente por lo que para que no haya riesgo de rotura, como máximo deben circular por cada placa 3A. Asimismo, la tensión máxima admisible es 250 V.



2.1.15 CAUDALÍMETRO DE EFECTO CORIOLIS.

Este tipo de caudalímetro mide caudal másico en lugar de volumétrico, es mucho más exacto porque este principio de medición no está afectado por factores físicos, por lo que pueden ser medidos todo tipo de fluidos. Los caudalímetros de efecto Coriolis registran simultáneamente la densidad del fluido y el caudal másico, y con la ayuda de sensores de temperatura, también pueden supervisar la temperatura del fluido. La medición de estas variables primarias permite calcular y visualizar otras variables derivadas de estas, como el caudal volumétrico, el contenido en partículas sólidas, o valores de concentraciones o de densidades derivadas. Además, son un método directo de medición de caudales másicos con una exactitud de medición alta (Incertidumbre del 0,1% de la medida).

Otras ventajas de estos dispositivos que podríamos también citar es que no hay partes móviles que se desgasten o reemplacen, minimizando así el mantenimiento a largo plazo, que no necesitan filtros y que las pérdidas de presión que producen son muy bajas. Sin embargo, su coste es una de las desventajas más notables. Como lo que se pretende es realizar una medición lo más precisa posible del caudal que circula por cada uno de los captadores se colocara un caudalímetro de efecto Coriolis en cada una de las ramas, tal y como muestra el esquema de la instalación. Los Coriolis empleado son de la serie F025S cuyo transmisor es el modelo 2700 con tarjeta de opción de entradas/salidas configurables. La herramienta de comunicación con este dispositivo es el software Prolink II.

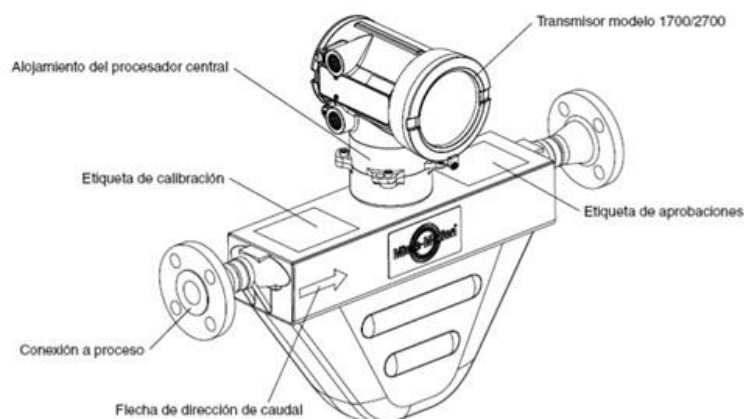
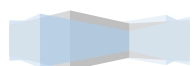


Figura 37: Esquema del caudalímetro efecto Coriolis.

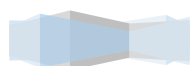


2.1.16 VARIADOR DE FRECUENCIA.

Un variador de frecuencia es un sistema para el control de la velocidad de giro /régimen de la bomba por medio del control de la frecuencia de alimentación de ésta. Se trata del modelo A4004 de la serie JX de la marca OMRON. Dispone de una capacidad de suministro de potencia máxima de 0,4KW y permite el control de la frecuencia de salida mediante la entrada de una señal de voltaje de 0-10V. De esta manera, una señal de 0V en los bornes de los terminales de control del variador supondrá 0HZ mientras que una señal de 10V en esos mismos terminales supondrá una frecuencia de 50HZ y el funcionamiento de la bomba circuladora a su máximo régimen de giro.



Figura 38: Variador de frecuencia OMRON A4004 JX.



2.1.17 TERMOPARES.

Para poder conocer la distribución de temperatura a lo largo del panel absorbedor, las distintas temperaturas que experimentan ambas placas durante el proceso y poder estudiar, en función de la posición de los tubos con respecto a la placa, cómo evoluciona la transmisión del calor al fluido entre otras propiedades, están situados a lo largo de cada placa una serie de termopares que miden la temperatura a la que se encuentra la superficie que ocupan.

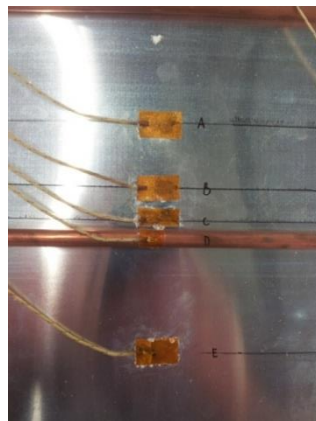
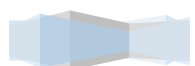


Figura 39: Detalle de cómo están posicionados los termopares en cada sección de medida.

En el esquema de la Figura 40 que se presenta se puede observar las posiciones que ocupan cada termopar y su nomenclatura en función de ésta. Los termopares se han instalado entre la cara inferior de la lámina y el aislamiento. Además, se encuentran repartidos longitudinalmente en 11 secciones, ya estén a 14, 35, 70, 140, 210, 350, 490, 770, 1080, 1290 ó a 1610mm de los 1855mm de longitud total de la placa. Las secciones 3, 5, 7, 9 y 10, a su vez, están divididas en cinco zonas transversales A, B, C, D y E (Figura 39) según la posición con respecto al tubo central, mientras que el resto de las secciones únicamente disponen de las zonas A y D. La sección A se encuentra sobre el tubo central, la B a 10mm del eje, la C a 25mm del eje, y la D y E a 55mm simétricamente. Así, el termopar llamado A10 es el que se sitúa en la sección 10 en la zona A, es decir, a 1290 mm de longitud desde el extremo inicial de la placa y sobre el tubo central.



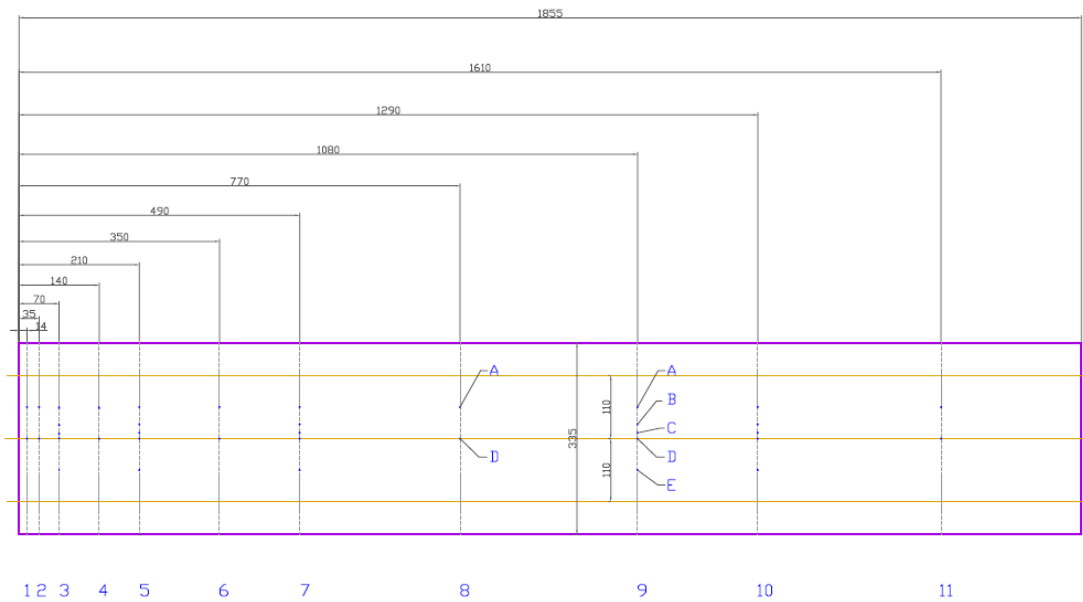


Figura 40: Esquema de las secciones donde están posicionados los termopares en el colector.

Además, existe una sexta zona llamada J que sólo se da en el extremo final de la placa, a 1855mm de longitud, que se utiliza para llamar a los termopares situados ya no encima de la placa sino en contacto con el tubo central y posicionados regularmente como se muestra en la figura.

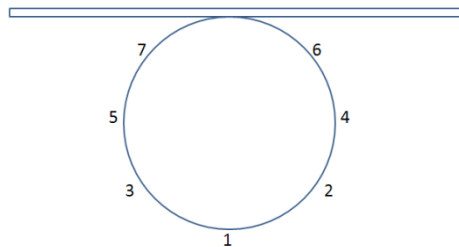
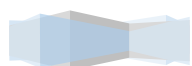


Figura 41: Posición de los termopares en la sección J.

El termopar llamado J1 será aquel que esté sobre el tubo central a 180° con respecto al punto de contacto del tubo y la placa.

El modelo de termopar utilizado para este fin es un termopar de lámina de cemento de poliamida de tipo T que especifica su diámetro de 12mm. Su unión caliente del sensor se encuentra entre 2 láminas finas de poliamida de cristal fino reforzado para alta temperatura.



Proporcionan soporte y aislamiento eléctrico al termopar además de proporcionar una superficie plana para poder fijarlo. Viene con 2 metros de cable de fibra de vidrio de 0.2mm. Son fáciles de instalar utilizando tanto el adhesivo que incorpora como resina epoxy. Resisten temperaturas de hasta 220°C y, como todos los instrumentos de medida descritos hasta el momento, están conectados al ordenador.

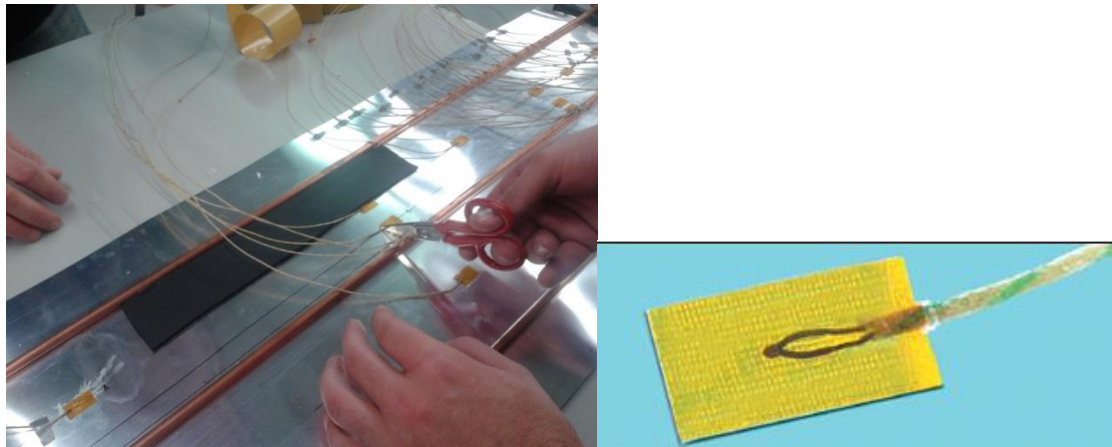
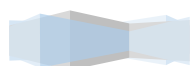


Figura 42: Termopares tipo T posicionados sobre el colector de la instalación.



2.1.18 DISPOSITIVO TÉRMICO RESISTIVO: RTD'S.

Los RTD's son sensores de temperatura resistivos. En ellos se aprovecha el efecto que tiene la temperatura en la conducción de los electrones para que, ante un aumento de temperatura, haya un aumento de la resistencia eléctrica que presentan. Se conectarán con cable telefónico desde la instalación a la sala de control.

➤ CARACTERÍSTICAS.

- ✓ Intercambiables sin recalibración sensor a sensor.
- ✓ Inercia térmica muy pequeña para ofrecer un rápido tiempo de respuesta.
- ✓ Detección de la temperatura del aire o el líquido.
- ✓ Fiabilidad demostrada.
- ✓ Estabilidad a largo plazo.

Aplicaciones Habituales.

- ✓ Climatización – temperaturas ambiente, de los conductos y del refrigerante.
- ✓ Control de Procesos – regulación de la temperatura.
- ✓ Electrodomésticos – temperaturas de cocción y limpieza.

Especificaciones.

Estos RTD's han sido conectados mediante cables de señal que serán llevados hasta la sala de control. Esto supondrá una ventaja a la hora de una revisión rutinaria en caso de fallo de una de las señales.



Figura 43: Conexión interna electrónica RTD.



Figura 44: Dispositivo RTD.



2.1.19 DIFERENCIALES DE PRESIÓN.

Es un transmisor de presión inteligente para la medición diferencial, manométrica y absoluta de diámetro, nivel y flujo. El transmisor se basa en un sensor capacitivo probado en el campo, que ofrece un funcionamiento seguro y de alto rendimiento.

Se instalarán dos diferenciales de presión en el circuito diseñado para el estudio experimental de fricción de las diferentes láminas a investigar. Cada diferencial trabajará en dos rangos diferentes de presión, para así poder ensayar con un amplio rango de caudales.

Diferencial de presión instalado. LD301.

La tecnología digital que se usa en el LD301 permite seleccionar varios tipos de funciones de transferencia, una fácil interfaz entre el campo y la sala de control, y algunas características que reducen notablemente los costos de instalación, operación y mantenimiento.

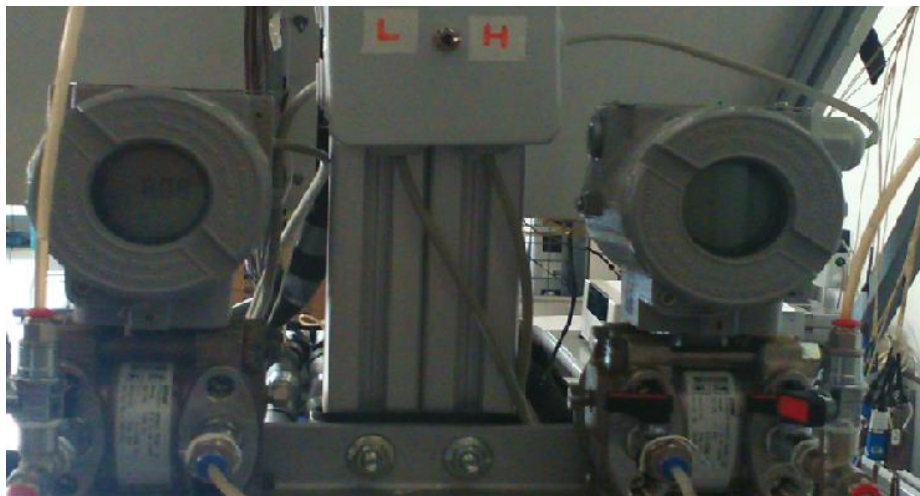


Figura 45: Diferencial de presión.

La precisión global de la medición de flujo, nivel, o presión depende de muchas variables. Aunque el transmisor tenga un desempeño excelente, la instalación adecuada es esencial para aprovechar al máximo los beneficios obtenidos.

Entre todos los factores que pueden afectar la precisión de los transmisores, las condiciones ambientales son las más difíciles de controlar. Sin embargo, hay maneras de reducir los efectos de temperatura, humedad y vibración.



El **LD301** tiene en su circuito un sensor de temperatura que compensa las variaciones de temperatura. En fábrica, cada transmisor es sometido a varios ciclos de temperatura, y las características del sensor, bajo temperaturas distintas son grabadas en la memoria del transmisor. En el campo, esta característica atenúa el efecto de la variación de temperatura.

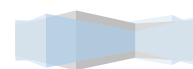
Los efectos debido a la variación de la temperatura pueden atenuarse, ubicándose el transmisor en áreas protegidas a los cambios ambientales.

En entornos cálidos, debe instalarse el transmisor de manera a evitar, al máximo, la exposición directa a los rayos solares. También debe evitarse la instalación cerca de tuberías y recipientes sometidos a temperaturas altas. Use secciones más largas de tubos de impulso entre el conector y el transmisor siempre que el ducto opere con fluidos de altas temperaturas. Cuando sea necesario, debe usarse aislamiento térmico para proteger el transmisor de fuentes externas de calor.

El circuito electrónico es protegido por un revestimiento a prueba de humedad, pero las exposiciones frecuentes pueden afectar tal protección. También es importante mantener las tapas bien ajustadas en su lugar. Cada vez que se mueven, las roscas son expuestas a la corrosión, desde que estas partes no estén protegidas con pintura. Se deben usar cintas de resina, o métodos de aislamiento similar, en los conductos eléctricos para evitar la penetración de humedad.

Aunque el transmisor sea prácticamente insensible a las vibraciones, debe evitarse la instalación cerca de bombas, turbinas u otros equipos que generen una vibración excesiva. En caso de ser inevitable, instale el transmisor en una base sólida y utilice tubos flexibles que no transmitan vibraciones.

También se debe evitar instalaciones donde el fluido del proceso pueda congelarse en la cámara de medición, o que pudiera traer daños permanentes a la célula capacitiva.



Conexión Eléctrica.

Las terminales de prueba y de comunicación permiten, respectivamente, medir la corriente en la malla de 4-20 mA, sin abrir el circuito, y establecer comunicación con el transmisor. Las “Terminales de Prueba” deben de ser utilizados para medir corriente. La Terminal “COMM” debe de ser usado para comunicación HART. El bloque de terminales tiene tornillos en donde las terminales de tipo gancho o de anillo pueden ser conectados.

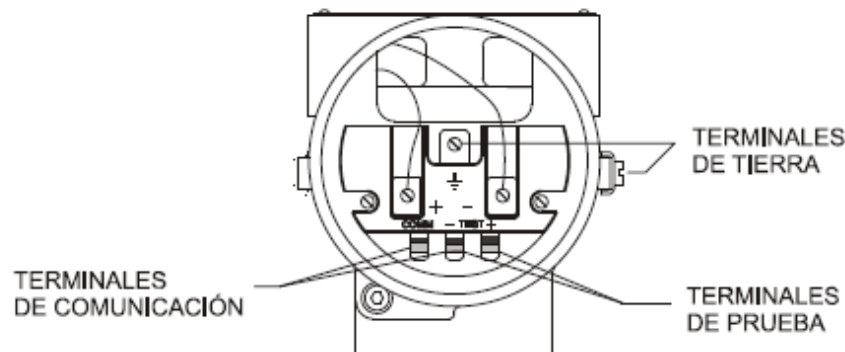


Figura 46: Conexión eléctrica.

Para más comodidad, hay dos terminales a tierra: uno dentro de la tapa y uno externo, cerca de las entradas de los conductos.

Se recomienda el uso de cables de par trenzado (de la equivalencia 22 AWG o superior). Para ambientes con alto índice de interferencia electromagnética (EMI arriba de 10 V/m) se recomienda el uso de conductores blindados. Aterrice el blindaje solo en uno de los extremos.

Evite instalar los cables de señal cerca de los cables de energía o conmutadores eléctricos. Las roscas de conexión de las tomas de corriente deben aislarse según los métodos requeridos por el área; los conductos no usados deben cerrarse con tapón y cinta de aislamiento, conforme los procedimientos indicados. El LD301 es protegido contra la polaridad invertida.



Display de Cristal Líquido.

El indicador de cristal líquido puede mostrar una o dos variables, que pueden ser seleccionadas por el usuario. Cuando dos variables son seleccionadas, el visor las mostrará alternadamente con un intervalo de 3 segundos.

El indicador de cristal líquido es constituido por un campo de 4½ dígitos numéricos, un campo con 5 dígitos alfanuméricos y un campo con informaciones.

Cuando se muestra la totalización, la parte más significativa aparece en el campo numérico (superior) y la parte menos significativa en el campo de variables (inferior).

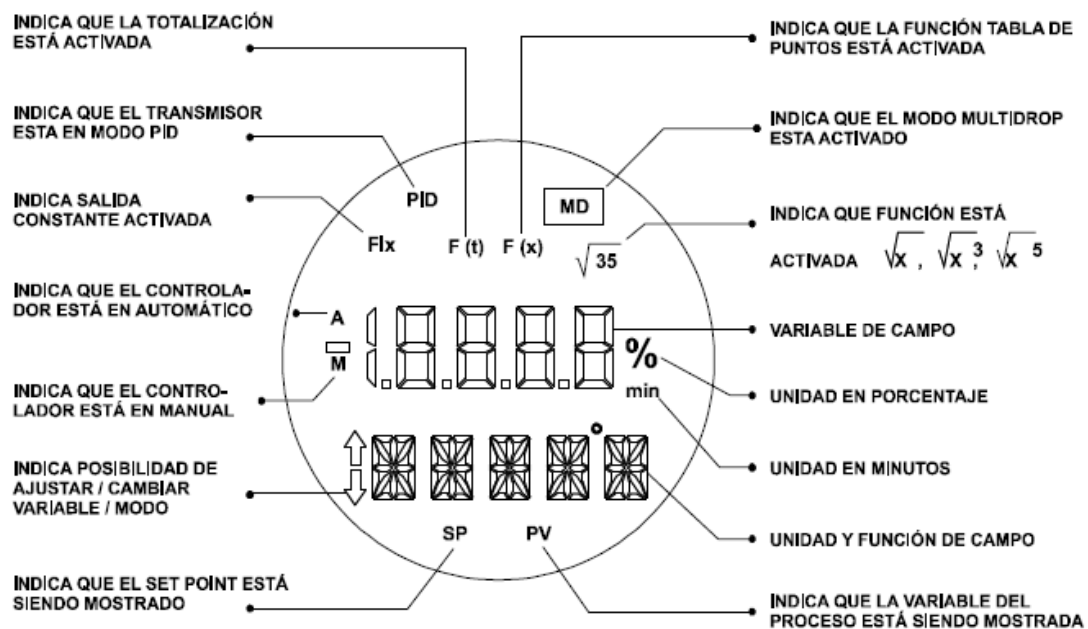


Figura 47: Display.

Durante la operación normal, el LD301 está en el modo monitoreo. En este modo, la indicación es alternada entre la variable primaria y la secundaria como es configurado por el usuario. Observe la Figura 53 el indicador muestra las unidades de ingeniería, valores y parámetros simultáneamente con la mayoría de los indicadores de estado. El modo de monitoreo es interrumpido cuando el usuario realiza el ajuste local completo. El display del LD301 es capaz, también mostrar montajes y errores.



2.1.20 CAUDALÍMETROS DE TURBINA.

Se utilizan para medir el caudal que circula por cada uno de los tubos de las placas del colector basándose en la tecnología de turbinas. Están situados en la parte superior de cada colector y van acompañados de unas válvulas de microrregulación que se detallan en el siguiente apartado. Es necesario la inclusión de este instrumento para minimizar las pérdidas de carga que existen como consecuencia de la disposición de los tubos del colector con respecto a la tubería principal de alimentación de fluido, esto es, por la presencia de tres codos por la disposición geométrica de los tres tubos situados entre ellos paralelamente y perpendicularmente con respecto a la tubería principal. De manera que, tras la medición de caudal realizada, se puedan igualar los caudales que fluyen por cada tubo regulando las válvulas que acompañan.

El modelo utilizado es el Gems FT-210 que puede medir desde 0,1 a 2,5 l/min a 22000 pulsos por litro y a temperaturas entre -20 y 100°C. Además, dispone de un sistema que permite conectarlo al ordenador proporcionando una señal de salida cuya frecuencia varía linealmente con la velocidad del flujo.

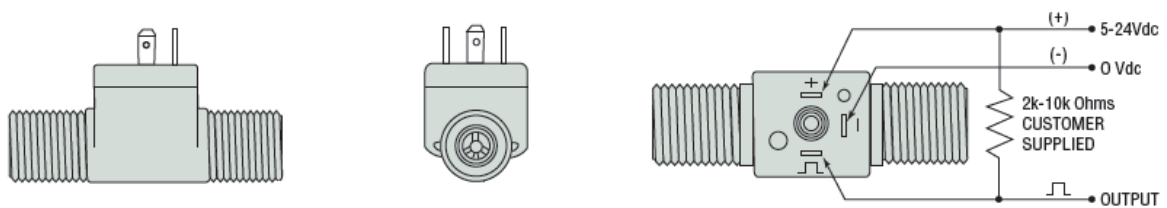


Figura 48: Caudalímetros de turbina Gems FT-210.



2.1.21 VÁLVULAS DE MICRORREGULACIÓN.

Las válvulas de microrregulación se utilizan para regular el caudal que fluye por cada uno de los tubos de las placas del colector de manera que circule la misma cantidad por cada uno de ellos. De esta manera se consiguen controlar las pérdidas de carga por la geometría de la instalación. Están situados delante de los caudalímetros de turbina por lo que son seis las válvulas de este tipo las instaladas.

El modelo utilizado es HOKE serie 2300 con apertura/cierre de aguja de dos vías que trabaja como máximo a 207 bares a 38°C hasta aproximadamente 70 bares a 121°C.

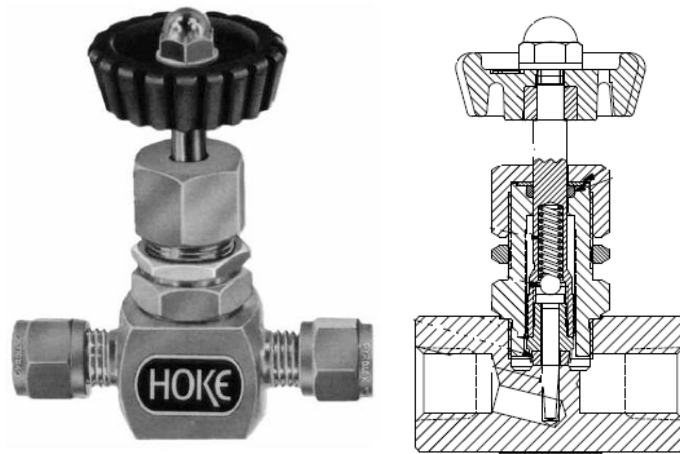


Figura 49: Válvulas de microrregulación HOKE2300.



2.1.22 SONDA DE TEMPERATURA AMBIENTE.

Se encuentra adherida a la luterma que aísla al Colector2 en su parte central en contacto con el ambiente. Tiene la función de medir la temperatura que existe en el ambiente de la instalación para poder tener una estimación del balance calorífico existente entre el exterior y el interior del colector.

El tipo de sonda instalado para la adquisición de la temperatura ambiente es una sonda PT100 apantallada, que conectada a tres hilos, permite la medición del valor de la temperatura minimizando al máximo posibles efectos externos existentes.



2.1.23 CONTROLADOR PID.

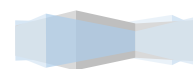
Un PID es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor Proporcional determina la reacción del error actual. El Integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. El Derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso vía un elemento de control como la posición de una válvula de control o la energía suministrada a un calentador. El peso de la influencia que cada una de estas partes tiene en la suma final, viene dado por la constante proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo, respectivamente. La respuesta del controlador puede ser descrita en términos de respuesta del control ante un error, el grado al cual el controlador llega al "set point", y el grado de oscilación del sistema. Nótese que el uso del PID para control no garantiza control óptimo del sistema o la estabilidad del mismo.

Para el correcto funcionamiento de un controlador PID que regule un proceso o sistema se necesita, al menos:

- Un sensor, que determine el estado del sistema (termómetro, caudalímetro, manómetro, etc.).
- Un controlador, que genere la señal que gobierna al actuador.
- Un actuador, que modifique al sistema de manera controlada (resistencia eléctrica, motor, válvula, bomba, etc.).

El sensor proporciona una señal analógica o digital al controlador, la cual representa el punto actual en el que se encuentra el proceso o sistema. La señal puede representar ese valor en tensión eléctrica, intensidad de corriente eléctrica o frecuencia. En este último caso la señal es de corriente alterna, a diferencia de los dos anteriores, que también pueden ser con corriente continua.

El controlador lee una señal externa que representa el valor que se desea alcanzar. Esta señal recibe el nombre de punto de consigna (o punto de referencia), la cual es de la misma



naturaleza y tiene el mismo rango de valores que la señal que proporciona el sensor. Para hacer posible esta compatibilidad y que, a su vez, la señal pueda ser entendida, habrá que establecer algún tipo de interfaz, son pantallas de gran valor visual y fácil manejo que se usan para hacer más intuitivo el control de un proceso. El controlador resta la señal de punto actual a la señal de punto de consigna, obteniendo así la señal de error, que determina en cada instante la diferencia que hay entre el valor deseado (consigna) y el valor medido. La señal de error es utilizada por cada uno de los 3 componentes del controlador PID. Las 3 señales sumadas, componen la señal de salida que el controlador va a utilizar para gobernar al actuador. La señal resultante de la suma de estas tres se llama variable manipulada y no se aplica directamente sobre el actuador, sino que debe ser transformada para ser compatible con el actuador utilizado.



Figura 50: PID Watlow PM8 EZ-ZONE.

En la instalación que nos ocupa se ha precisado de un PID para controlar la temperatura de entrada al colector. Para cada uno de los ensayos llevados a cabo se ha establecido una temperatura de consigna de 15°C . Se ha utilizado: como medidor, una sonda de temperatura puesta a la entrada del colector; como Controlador, el mismo PID a través del programa facilitado por el fabricante; y como Actuador, una resistencia eléctrica conectada con el PID. El modelo utilizado es un “PM8 EZ-ZONE” fabricado por WATLOW.

El PID está conectado a la alimentación con corriente monofásica a 220V, le llegan los 3 hilos de la PT100, y tiene una salida a los relés. Los relés están conectados a 220V, dan potencia a las resistencias (conectado con una fase en serie) y reciben la señal del PID para saber cuánta potencia tienen que dar. (Ver Anexo para más información).



2.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.2.1 AGILENT.

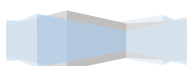
El Agilent 34980A es un equipo de medida tipo switch para la adquisición de datos equipado con 8 ranuras para tarjetas electrónicas y 21 módulos a los que poder conectar los distintos sistemas de prueba para su medición. Tiene un fácil acceso remoto con una aplicación de interfaz Web. Se utiliza principalmente para medir la tensión que circula por cada instrumento conectado a las tarjetas. La medida se realiza en paralelo, la conexión de los aparatos a las tarjetas se hace directamente a través de cableado

En la instalación se mantienen ocupadas cuatro de las ocho ranuras disponibles. Una de ellas es utilizada para control de equipos (de salida), los cuales se conectan en canales de tensión, y a través de una señal de 0-10V se obtienen los datos proporcionados por cada uno de ellos; otra para la medida de la temperatura ambiente de las sondas PT100 en canales de voltaje, y el gasto másico en canales de intensidad; y las dos restantes están conexas con los termopares para la medición de la temperatura en los colectores.



Figura 51: Vista delantera y trasera de Agilent 34980^a.

La medida de la tensión que circula por cada instrumento se realiza directamente por la conexión de cables lanzados desde el instrumento hasta las tarjetas.



2.2.2 MEDIDAS DE INTENSIDAD: TRANSDUCTOR DE INTENSIDAD.

El transductor de intensidad tiene como finalidad transformar los amperios salientes del autotransformador en miliamperios para poder introducirlos en el Agilent que como máximo admite 0,5-1A. Tiene por entradas la alimentación a 24V de la fuente y el Torivac que está conectado en serie con el convertidor y entra y sale de él. Por último tiene la señal de salida.

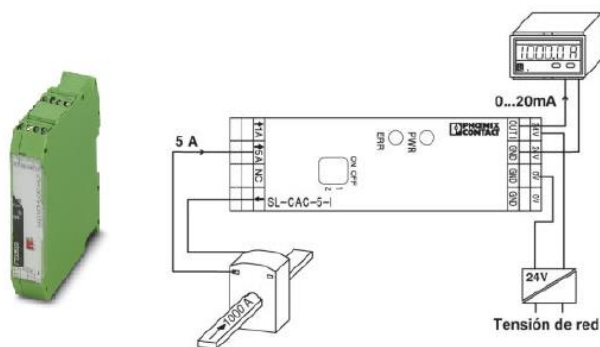


Figura 52: Transductor de intensidad MACX MCR-SL-CAC-5-I(-UP) y detalle de cómo debe ser conectado.

El modelo utilizado es el MACX MCR-SL-CAC-5-I (-UP) que convierte corriente alterna de 1 A ó 5 A en señales analógicas normalizadas de 0-20 mA (en off) ó 4-20 mA (en on). Además permite modificar la corriente de entrada y salida mediante un interruptor PID. El convertidor de corriente MACX MCR-SL-CAC-5-I contiene un rango de tensión de alimentación de 19,2-30 V DC.



2.2.3 TARJETA DE RELÉS.

Para poder controlar la enfriadora remotamente se ha conectado a una tarjeta de relés que se activan o desactivan según se precise.

La tarjeta de relés es un sistema de control cuya función es manipular indirectamente los valores de un sistema controlado. Su objetivo es gobernar un sistema sin que el operador intervenga directamente sobre sus elementos. La tarjeta actúa de puente o enlace bidireccional entre el ordenador y el sistema que se quiere controlar (la enfriadora en este caso): por un lado, traduce las órdenes del ordenador y las hace llegar a los actuadores; y por otro, recoge las señales de los sensores y, tras adaptarlas para que el ordenador pueda entenderlas, las envía a este para que las tenga en cuenta en la ejecución del programa.



Figura 53: Tarjeta de relés para control de la enfriadora.

En términos más generales la función general de la tarjeta de relés es controlar remotamente los equipos, más concretamente para encenderlos o apagarlos, abriendo o cerrando el circuito eléctrico del equipo dejando pasar o no la corriente.



2.3 PROTOCOLO DE ENSAYO.

En este apartado se va a proceder a explicar con detalle el procedimiento a seguir para la puesta en funcionamiento de la instalación donde se ha llevado a cabo el estudio experimental del que trata este Proyecto Fin de Carrera.

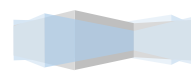
2.3.1 SELECCIÓN DEL MODO DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA.

La bomba puede accionarse tanto en modo automático como en modo manual. Para este tipo de ensayo es necesario controlar la bomba a través del ordenador con la aplicación web del Agilent 43980A, es decir, activar el modo automático del variador de frecuencia.



Figura 54: Variador de frecuencia a través del cual se cambia el modo de funcionamiento de la bomba.

Para seleccionar un nuevo modo de funcionamiento, el variador de frecuencia no debe estar en funcionamiento, esto quiere decir que el piloto led “RUN” (1) que indica que el variador se encuentra en ese momento activo, debe estar apagado. En el caso de que esté activo deberemos presionar el botón Start/Stop (2).



A continuación, utilizando las teclas de selección (4), puede aparecer en la pantalla los números 00 ó 01. La cifra 00 corresponde al modo manual y la 01 al modo automático, por lo que una vez encontrada la cifra 01 se selecciona presionando el botón (5).

Una vez seleccionado el modo automático hay que seleccionar la bomba. Para ello se presiona el botón azul (3) durante 2 segundos hasta que aparezca *d001* que corresponde con la bomba. Seguidamente se vuelve a presionar el mismo botón (3) para seleccionar dicho modo.

Finalmente se presiona el botón RUN (1) para dejar activado el modo automático.

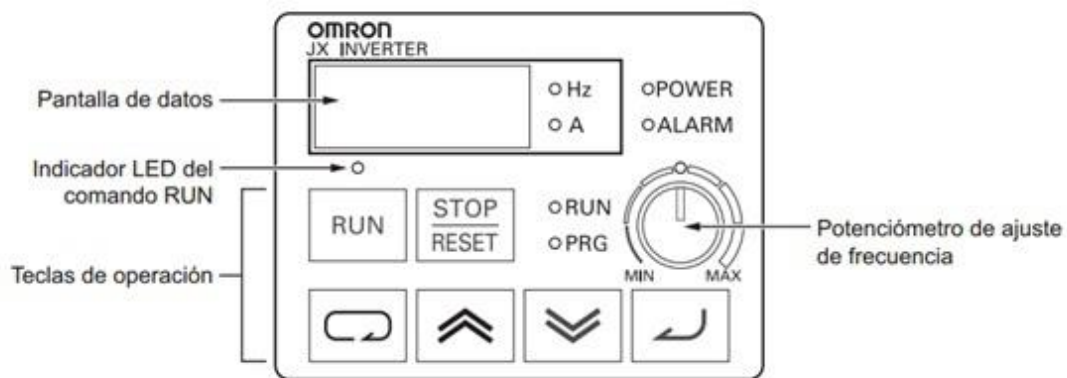


Figura 55: Teclas de operación del variador de frecuencia.

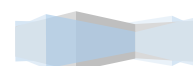


2.3.2 PUESTA A PUNTO PARA LA TOMA DE DATOS.

La toma de los datos se realiza mediante “Agilent 34980A” y el software “Agilent BenchLink Data Logger”. “Agilent 34840A” trata de una unidad de medida multifunción tipo Switch que posee 8 módulos donde se pueden insertar tanto tarjetas de adquisición como de control.

La regulación del caudal que circula por los colectores se puede realizar de dos formas diferentes. La primera opción es la de tener la válvula de control abierta en su totalidad y variar la frecuencia de la bomba circuladora de caudal mediante una señal de salida de 0-10V. De esta manera una tensión de 0V corresponde a 0Hz y una tensión de 10V a una frecuencia de 50Hz donde la bomba gira a su máximo régimen. La segunda opción es la de mantener la bomba a una frecuencia fija de 50 Hz y regular el caudal variando la curva resistente de la instalación mediante la apertura o cierre de la válvula. De manera similar a como se varía el régimen de giro de la bomba, al inducir una tensión de 0V la válvula estará completamente cerrada mientras que con una tensión de 10V permanecerá totalmente abierta. Se ha decidido regular el caudal que circula por los tubos mediante la primera opción por ser el control del variador de frecuencia más preciso que el de la válvula y se pueden obtener mayor cantidad de puntos de ensayo en un pequeño rango de caudales.

Para comenzar a realizar las medidas y almacenar los datos deberemos de tener abierto tanto el software “BenchLink Data Logger” como la aplicación web. Y estas deberán estar correctamente configuradas.



2.3.3 POTENCIA Y CAUDAL. APLICACIÓN WEB DEL AGILENT (IP).

“Agilent 43980A” dispone de un programa web que permite tanto la lectura de medidas, como el control de las señales de salida así como la configuración del equipo multifunción de una manera más sencilla que con los propios botones físicos de la carcasa del Switch. Para activarla se deberá tener el PC y el sistema de medida conectados mediante cable LAN de forma directa o mediante otro Switch de conexiones y con direcciones IP que se encuentren en el mismo rango. De esta manera, introduciendo la IP del Agilent 34980A en la barra de direcciones del navegador, entraremos directamente en la aplicación web de nuestro equipo.

En el ensayo que nos ocupa, la aplicación Web del Agilent se va a utilizar tanto para establecer el caudal que se quiere circule por la instalación así como para imponer la potencia que se quiere suministrar a las mantas a través de imponerle al Torivac la tensión que debe suministrar al variador de frecuencia y a la resistencia de las mantas.

Para iniciar la aplicación web se introduce en la barra de direcciones del navegador la dirección IP 169.254.9.80 correspondiente al equipo de adquisición. Una vez ejecutado aparecerá una pantalla como la que se muestra en la Figura 56.

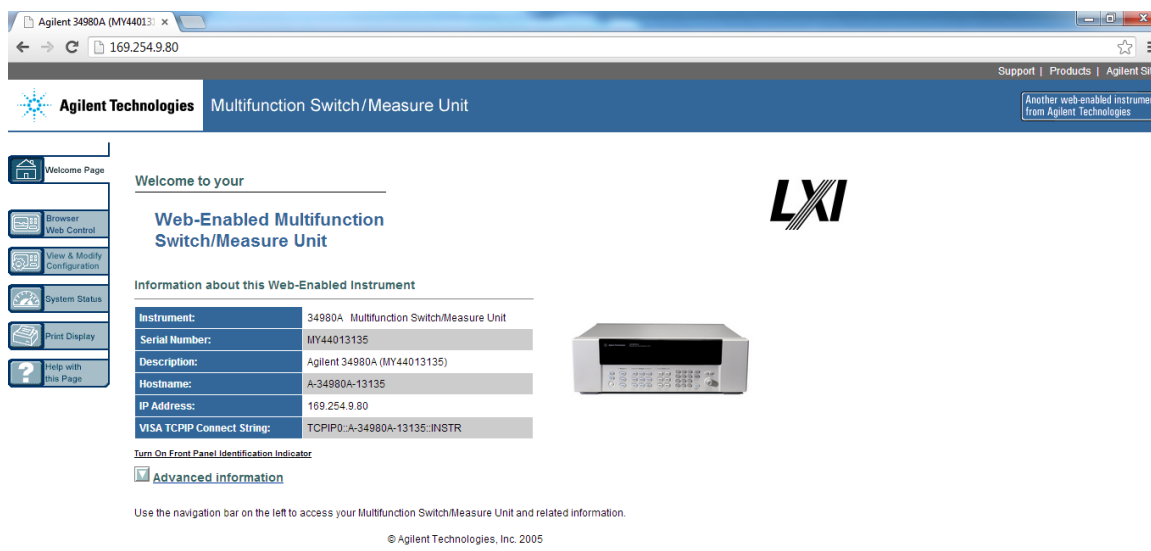


Figura 56: Página de inicio de la aplicación web de Agilent Technologies (IP).

A la izquierda se visualizan seis pestañas sobre las que se puede ir accediendo. La primera, *Welcome Page*, es la página de inicio que se visualiza; la segunda *Browser Web Control*, es la que se va a utilizar para controlar tanto la bomba como la resistencia de las mantas; y las cuatro siguientes, *View and Modify Configuration*, *System Status*, *Print Display*, *Help with this page*, se utilizarían en caso de ser necesarias para la función que su nombre indica.

Se trata de situarse en la pestaña *Browser Web Control* para seleccionar el canal de la tarjeta con la que se desee trabajar. Existen dos modos de trabajo, *Observe Only* y *Allow Full Control*. Estas dos opciones permiten entrar en un modo de visualización o en un modo de modificación y control completo de la tarjeta seleccionada. Por defecto viene seleccionado el modo de observación por lo que si queremos cambiar parámetros de la tarjeta de control deberemos tener activado el modo de control total. Por tanto, se debe clicar la opción *Allow Full Control* hasta que se ponga de color amarillo tal y como se ve en la Figura 57.

A continuación, de las cuatro tarjetas operativas (1), (2), (5) y (6) que aparecen, se pinchará aquel que contenga el cableado correspondiente a la resistencia de las mantas y al variador de frecuencia que controla la bomba, es decir, el módulo (5) que se ve en negrita en la Figura 57.

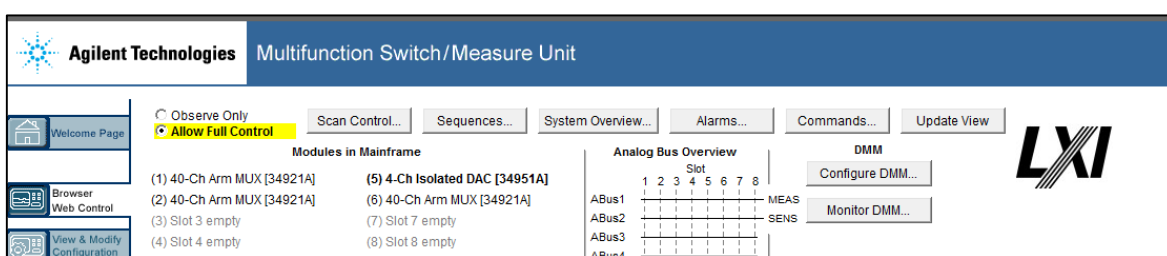


Figura 57: Selección de la opción Allow Full Control dentro de la pestaña Browser Web Control que proporciona el software para elegir la tarjeta con la que se quiere trabajar.

Al clicar el módulo (5) aparecen los cuatro canales que posee esta tarjeta con las opciones principales *Output*, *Function* y *Voltage Level* tal y como se ve en la Figura 58. El canal que controla el caudal que circulará por la instalación es el 5003, y el proporcionado para las mantas es el 5004.

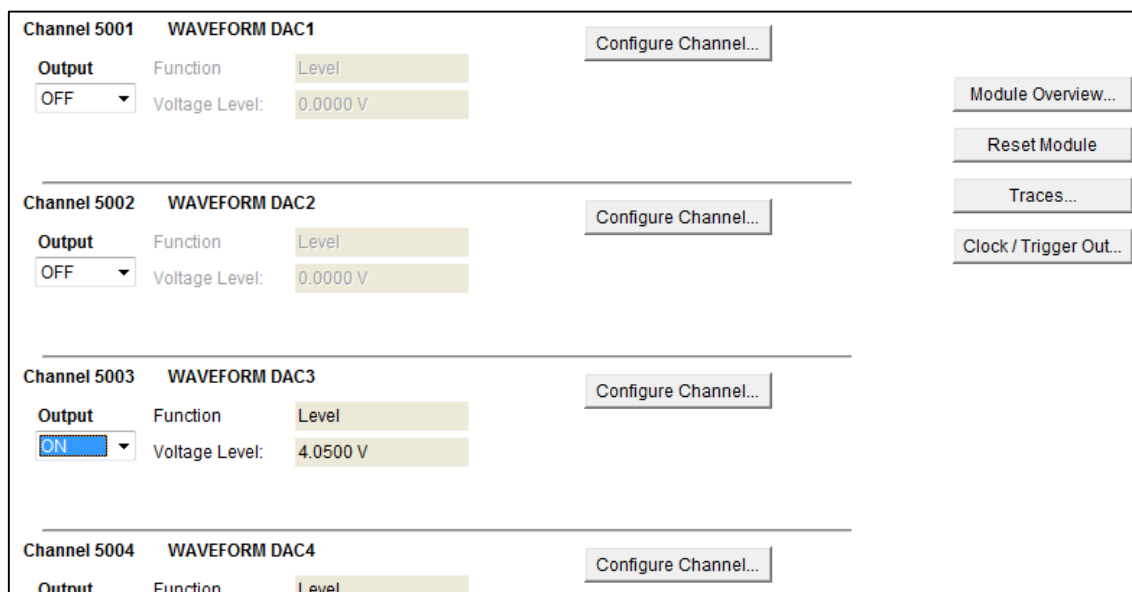


Figura 58: Al seleccionar la tarjeta con la que se quiere trabajar aparecen los canales que ésta contiene.

Para activarlos basta con poner en ON la opción *Output* (Figura 59) e introducir la tensión (Figura 60) que se asemeje con los kg/h o W que el ensayo requiera clicando en *Configure Channel*.

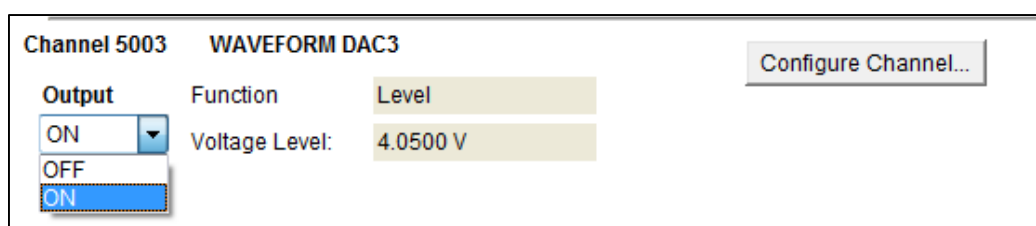


Figura 59: Para activar el canal que se precise basta con desdoblar la pestaña Output y seleccionar ON.

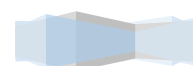
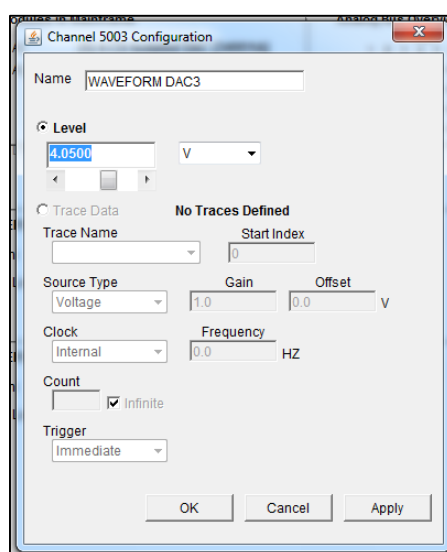


Figura 60: Pestaña de Configure Channel para introducir los voltios que se precisen para conseguir el caudal necesario.

En el estudio que este proyecto refleja se han hecho ensayos con cinco caudales a circular por cada uno de los colectores, estos caudales son: 27kg/h, 41,43kg/h, 63,63kg/h, 97,62kg/h y 150kg/h. Además, se han ensayado cada uno a dos potencias diferentes, 400W/m² y 800W/m². No hay una cifra exacta de tensión que equivalga a los caudales ensayados por entrar en juego el grado de apertura de las válvulas, se trata de ir introduciendo distintas tensiones hasta obtener la lectura del caudalímetro Coriolis deseada. Sin embargo, para establecer la potencia es suficiente con introducir una tensión específica ya que la resistencia de la manta es un valor casi constante (depende vagamente de la temperatura y por ello no llega a considerarse) que depende de la tensión que administre el Torivac. Así, para una potencia de 400W/m² equivalen a 234W y para una potencia de 800W/m² equivalentes a 468W.

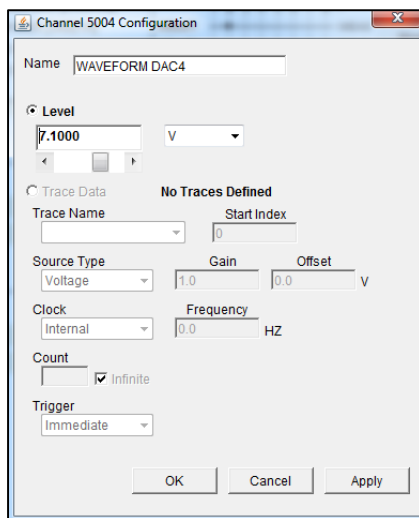
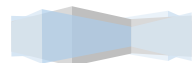


Figura 61: Pestaña Configure Channel del canal 5004 que contiene la potencia de la manta.

Una vez escrito el voltaje deseado basta con darle, o bien a *Apply* para aplicar y ver los cambios sin haber cerrado la ventana para poder seguir modificando la tensión, o bien a *Ok* para dejar fijada esa tensión.



Rango de caudales ensayados: de 9 a 50 kg/h.

De acuerdo con el Documento Básico HE de Ahorro Energético, sección HE4 “Contribución Solar mínima de agua caliente sanitaria” apartado 3.3.5.1. *Circuito hidráulico. Generalidades.* , “El caudal del fluido portador se determinará de acuerdo con las especificaciones del fabricante como consecuencia del diseño de su producto. En su defecto, su valor estará comprendido entre 1,2l/s y 2l/s por cada 100 m² de red de captadores.”

Los 1,2l/s y los 2l/s por cada 100m² se traducen en 43,2 l/hm² y 72 l/hm² respectivamente.

*Para un colector real, de 2m de longitud, 1m de ancho y un total de 9 tubos, se tiene un total de 2m² de superficie. Los valores de caudal máximos y mínimos que le corresponderían conforme a lo citado en el párrafo anterior serían pues de 86,4 l/h y 144 l/h, lo que equivale a un caudal mínimo por tubo de 9,6l/h y un caudal máximo por tubo de 16l/h.

*La superficie total del colector de la instalación es 0,585m², lo que se traduce en 25,27 l/h y 42,12 l/h de caudal mínimo y máximo de circulación. Por cada uno de los tres tubos de los que consta el colector pasará por tanto un caudal máximo de 14,04 l/h y un caudal mínimo de 8,42 l/h.

Equivalencia de W a V para la aplicación web del Agilent.

El procedimiento a seguir para obtener los voltios que son necesarios introducir en el canal 5004 de la aplicación web de Agilent para conseguir una determinada potencia es el que sigue. Como ejemplo se va a demostrar los 5V que corresponden con los 400W/m², pero el procedimiento de cálculo sería el mismo para cualquier caso de este tipo.

Los datos de los que se disponen inicialmente son:

- La resistencia de las mantas: una manta dispone de 27,7 Ω .
- La tensión máxima que admite la red es 230V.
- El Agilent trabaja de 0 a 10V, por lo que los 230V equivaldrán a los 10V máximos de trabajo de Agilent (relación de transformación del autotransformador $r=10/230$).



- La superficie total de cada manta es de $0,585\text{m}^2$ aproximadamente.
- La potencia en corriente continua es proporcional a la corriente y a la tensión, por lo que se puede escribir como $P = V \cdot I$. Si el dispositivo es una resistencia de valor R la potencia también puede calcularse como $P = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$.

Los pasos a seguir para el cambio de unidades, con la consiguiente aplicación del ejemplo mencionado, son los siguientes:

1. Obtener el equivalente en Watios a los Watios por unidad de superficie.

$$P = 400 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,585\text{m}^2 \approx 234\text{W}$$

2. Calcular la tensión que se precisa para conseguir esa potencia.

$$P = \frac{U^2}{R} \rightarrow U = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{234\text{W} \cdot 27,7\Omega} = 80,51\text{V}$$

3. Se aplica la relación de transformación de la tensión total con respecto a la del Agilent.

$$V_{ag} = r \cdot U = \frac{10}{230} \cdot 80,51 = 3,50\text{V (t. c. q. d.)}$$

*Hay que tener cuidado a la hora de introducir una tensión en cualquier de los dos canales ya que el Torivac sólo admite hasta 10V, y una vez pasado este punto hay riesgo de rotura tanto del Torivac como de los elementos a los que se les está suministrando tensión.

*Estos resultados son aproximados, ya que la tensión varía de 220-230 V, y dependiendo de lo que nos esté suministrando la red tendremos mayor o menor tensión en la manta térmica.

Tiempo de estabilización térmica.

Para hacer un seguimiento del correcto funcionamiento de la instalación a través de los datos proporcionados por cada uno de los elementos de ésta, se usa el programa “Benchlink Data Logger”. Este programa va midiendo y traduciendo las señales de tensión e intensidad que “Agilent” va recibiendo (se ha seleccionado la frecuencia máxima de escaneo que es de 3 escaneo por segundo), a la vez que las representa con



respecto al tiempo y las almacena con opción a proporcionar un archivo que contenga dichos datos. La apariencia inicial al abrir el programa es la que se muestra en la Figura 62.

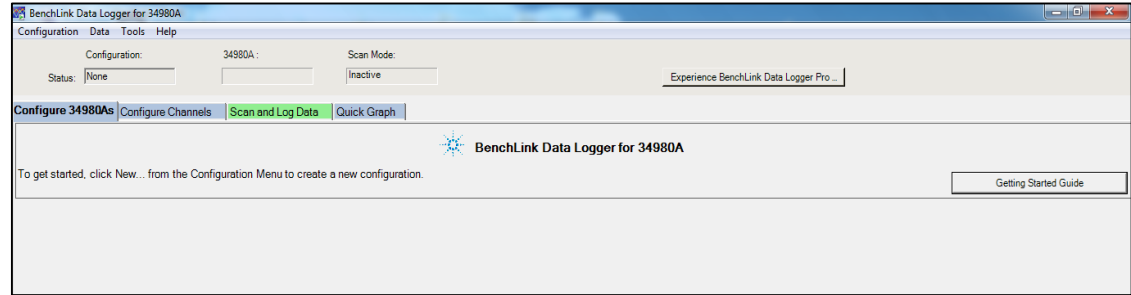


Figura 62: Inicio del programa Benchlink Data Logger.

Una vez abierto el programa es necesario que el programa tenga localizado “Agilent”, que es de donde obtendrá toda la información. Para ello, basta con hacer doble click en la opción que muestra la Figura 63 que representa el equipo mencionado (zona azul).

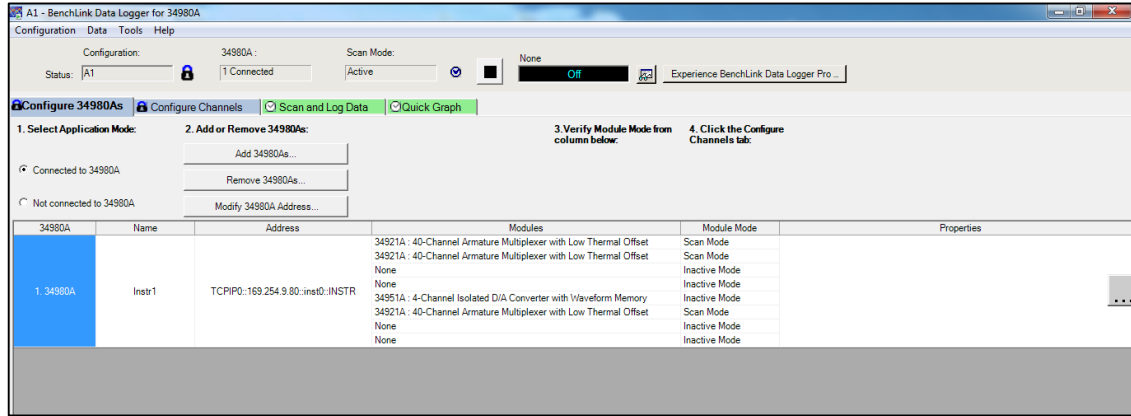
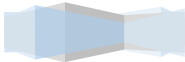


Figura 63: Localización del software Agilent dentro del programa Benchlink Data Logger.

A continuación se necesita un nuevo archivo de datos. En los ensayos que nos ocupan, al tener una configuración guardada es mucho más cómodo y rápido cargar un archivo anterior y modificarlo si fuera necesario que empezar de cero uno nuevo. Por ello, entrando en el menú *Configuration*, se seleccionará la opción *Open* tal y como se muestra en la Figura 64.



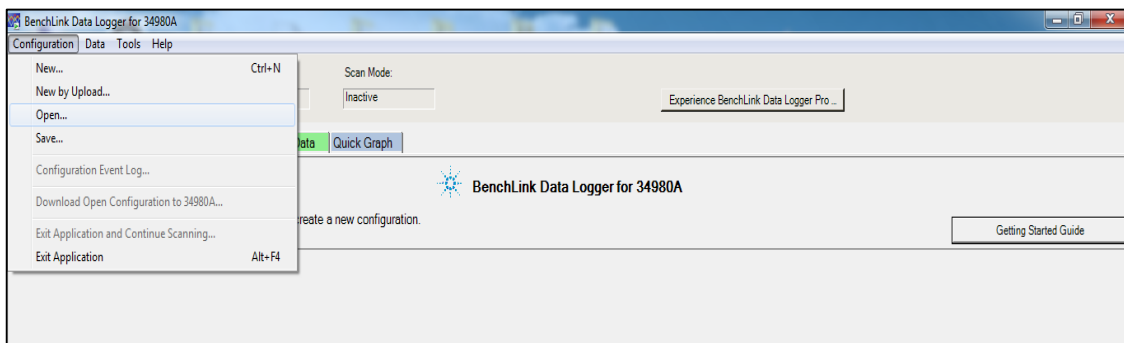


Figura 64: Abrir un nuevo archivo de datos a través de la pestaña Configuration.

Seguidamente aparecerá un listado de archivos anteriores realizados hasta el momento (Figura 65). Como en la realización de los ensayos se ha seguido un proceso ordenado y reiterado se aconseja cargar el último o uno de los últimos archivos pertenecientes a los últimos ensayos realizados para evitar cualquier posible error en la configuración del ensayo. Cuando se tenga localizado dicho archivo basta con darle a *Open*.

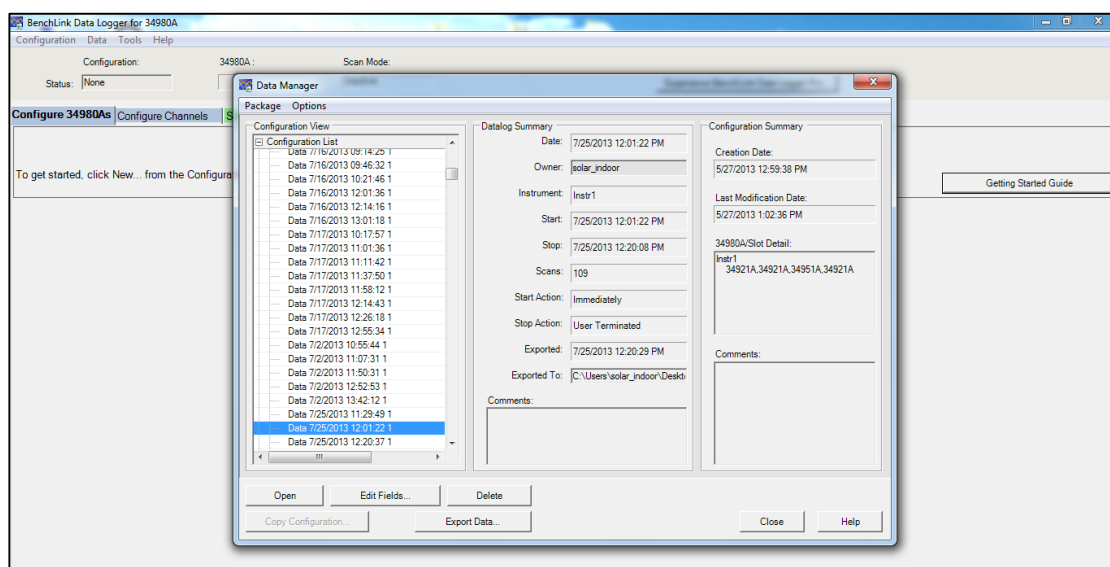
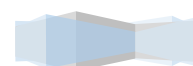


Figura 65: Selección del último archivo de datos utilizado.

Aparece entonces una página como la de la Figura 66 que, dentro de la pestaña *Scan and Log Data*, muestra los distintos canales que contienen los módulos de “Agilent” así como los nombres y unidades de la magnitud que mide cada uno de ellos. La pestaña *Channel* representa el nombre de los canales en los que se puede encontrar cada magnitud; *Scan Order* el orden de escaneo que se le impone a cada una; *Measurement* indica el modo de medida de cada magnitud según el tipo de señal que llega al Agilent, ya sea frecuencia,

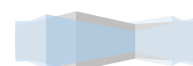


temperatura, corriente alterna o continua, o a través de la tensión; *Data* va proporcionando el valor de los datos que se van midiendo en el momento; *Alarm* es una opción que se puede configurar por si se quisiera que el programa avisara en caso tener un dato fuera del intervalo que se indicase; *Max* y *Min* proporcionan los valores máximos y mínimos alcanzados a lo largo del proceso de ensayo; y *Average* indica la media de los datos medidos hasta el momento.

A1 - BenchLink Data Logger for 34980A										
Configuration: 34980A: Scan Mode: None										
Status: A1 1 Connected Inactive Off Experience BenchLink Data Logger Pro...										
Configure 34980As Configure Channels Scan and Log Data Quick Graph										
34980A										
Set	Start	Interval	Stop	Set	Order	Set	Name	Export Data	Start/Stop	Scan Status
1. Instr 1	...	Immediately	00:00:10.00	User	...	Channel	...	Data <Date><Time>	Auto	Not Scanning
Last Scan Results										
	34980A	Channel	Scan Order	Measurement	Data	Alarm	Min	Max	Average	
34	<1.Instr 1>	1034	34	Temp (Type I)						
35	<1.Instr 1>	1035	35	Temp (Type T)						
36	<1.Instr 1>	1036	36	Temp (Type T)						
37	<1.Instr 1>	1037	37	Temp (Type T)						
38	<1.Instr 1>	1038	38	Temp (Type T)						
39	<1.Instr 1>	1039	39	Temp (Type T)						
40	<1.Instr 1>	1040	40	Temp (Type T)						
41	<1.Instr 1>	2001<G1>	41	Frequency						
42	<1.Instr 1>	2002<G2>	42	Frequency						
43	<1.Instr 1>	2003<G3>	43	Frequency						
44	<1.Instr 1>	2004<G4>	44	Frequency						
45	<1.Instr 1>	2005<G5>	45	Frequency						
46	<1.Instr 1>	2006<G6>	46	Frequency						
47	<1.Instr 1>	2007<T# Pared Exterior>	47	Temp 4-Wire RTD						
48	<1.Instr 1>	2008<T# Pared Exterior>	48	Temp 4-Wire RTD						
49	<1.Instr 1>	2009<V1>	49	AC Voltage						
50	<1.Instr 1>	2010<V2>	50	AC Voltage						
51	<1.Instr 1>	011<RTD Entrada colector	51	Temp 4-Wire RTD						
52	<1.Instr 1>	012<RTD Entrada colector	52	Temp 4-Wire RTD						
53	<1.Instr 1>	013<RTD Salida colector 1	53	Temp 4-Wire RTD						
54	<1.Instr 1>	014<RTD Salida colector 2	54	Temp 4-Wire RTD						
55	<1.Instr 1>	2015<RTD Ambiente>	55	Temp 4-Wire RTD						
56	<1.Instr 1>	2041<Coriolis2>	56	DC Current						
57	<1.Instr 1>	2042<Coriolis1>	57	DC Current						
58	<1.Instr 1>	2043<I1>	58	DC Current						

Figura 66: Aspecto del archivo de datos seleccionado donde aparecen los distintos canales que contiene el Agilent y sus unidades de medida.

El pulsador que se ve bajo la opción *Start/Stop* se utilizada efectivamente para activar o desactivar el escaneo, es decir, para iniciar y finalizar el ensayo. Para comenzar a recibir datos proporcionados por el Agilent se pulsará dicha tecla. La apariencia de esta pantalla una vez empezado el escaneo sería como el ejemplo que se muestra en la Figura 67 donde se llevan recopilados 61 escaneos en 10 minutos.



PFC: Estudio del comportamiento termohidráulico en tubos de colectores solares planos con láminas en espiral

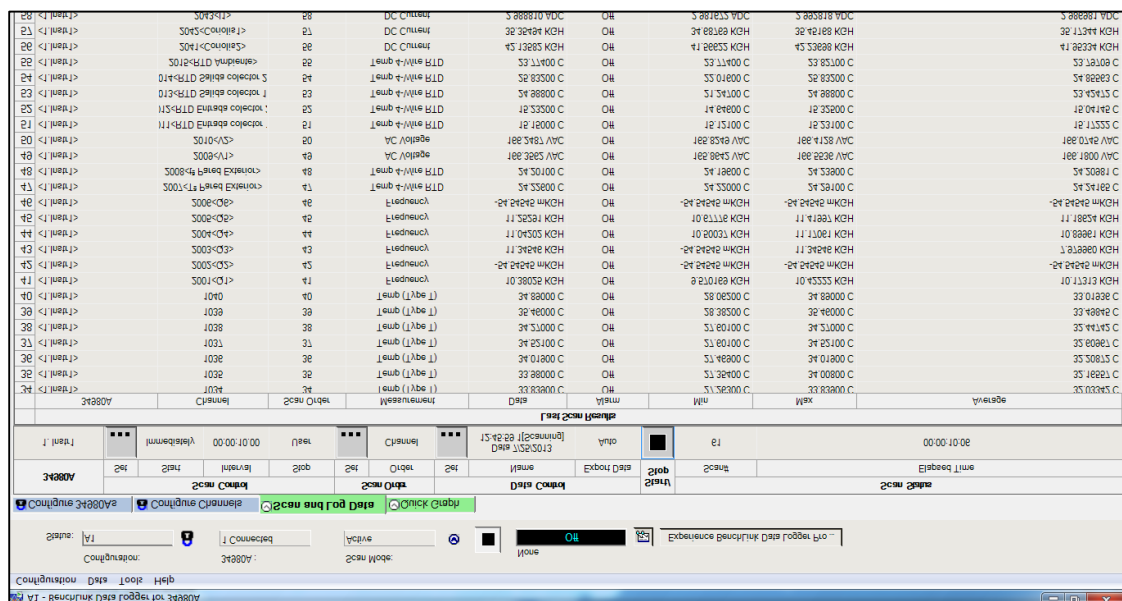


Figura 67: Apariencia de la pestaña *Scan and LogData* una vez iniciada la toma de medidas.

Existe la opción de ver gráficamente como cada una de las magnitudes medidas evolucionan con respecto al tiempo, tanto en conjunto como por separado, a través de la pestaña *Quick Graph*. En esta opción se pueden seleccionar desde los canales que se quiere sean representados, la escala de cada uno de los ejes, el valor origen, hasta los colores que represente cada canal.

En la Figura 68 se ve representada la temperatura de entrada en cada colector, con 15°C como valor origen, 1 minuto de escala en el eje X y 200m°C en el eje Y, el color azul marino para el canal 2012 que corresponde a la temperatura de entrada al colector 1, y el color blanco para el canal 2011 que corresponde a la temperatura de entrada al colector 2. En la tabla, en *Current Data* se puede leer el dato medido en el momento.

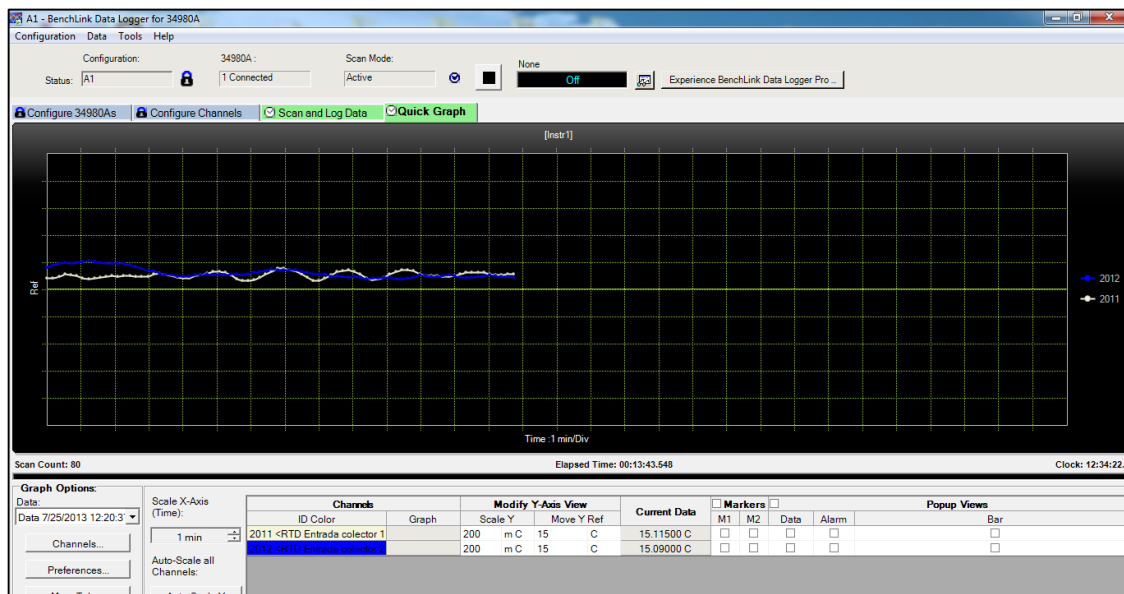


Figura 68: Apariencia de la pestaña *Quick Graph* al escoger dos canales de temperatura para su representación.

Para seleccionar los canales que se desean representar basta con clicar en el pulsador *Channels* en la parte inferior izquierda. Aparecerá un listado de los canales disponibles durante el ensayo con un cuadrado blanco a su derecha para poder seleccionarlos. Una vez elegidos basta con darle a *Ok* (Figura 69).

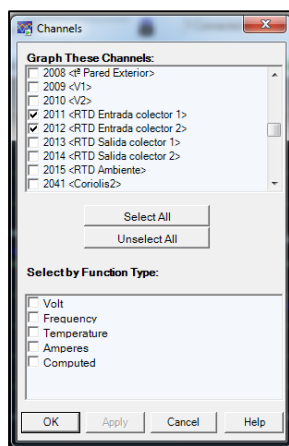
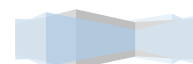


Figura 69: Opción *Channels* para seleccionar los canales que se quiere que sean representados gráficamente.

Además, existe un monitor que permite ver las mediciones de un solo canal sin necesidad de estar mirando la pestaña *Scan and Log Data* donde se ven las de todos los canales. Explica cómo se deja un relé abierto para estar visualizando la señal continua de un canal



(no lo valores discretos) Se encuentra en la parte superior de la pantalla y se activa dentro de la opción principal *Tools*.

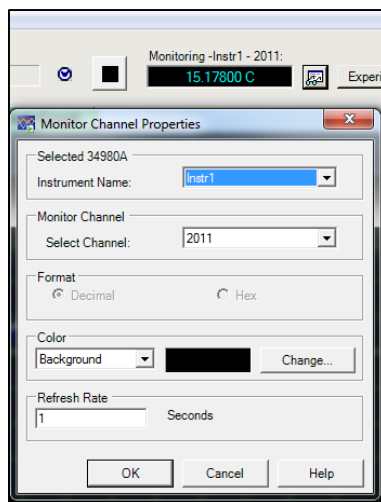


Figura 70: Pestaña *Monitor Channel Properties* para visualizar un canal en el monitor.

En el tipo de ensayos que abarca este proyecto, la opción gráfica se ha utilizado principalmente para controlar las temperaturas de entrada a los colectores. Se ha buscado que esta temperatura esté siempre en 15°C, por lo que gracias a esta aplicación se ha podido seguir su evolución hasta llegar a ella y ver su continuidad durante el tiempo que se ha pretendido tomar las mediciones.

Asimismo, también se ha permitido controlar que las temperaturas a lo largo del colector se encontraban dentro de los límites permitidos durante el ensayo y que, cualquiera de las otras magnitudes medidas, estaban siguiendo el rumbo esperado.

Por último, tras parar el escaneo, este programa además facilita guardar los resultados en un documento .csv que más tarde se puede pasar a los formatos deseados. Para guardar dichos resultados, al presionar el pulsador *Start/Stop* de nuevo, aparece una pantalla emergente. En esta pantalla se selecciona la opción *Export Data* en la parte inferior izquierda. Al presionar aparece una segunda pantalla emergente en la que habrá que presionar ahora el pulsador *Export to File* para direccionar los datos a la carpeta dentro del ordenador que se desee. Esto se hará a través de la tercera pantalla emergente que también te permite nombrar el archivo como guste (Figura 71).



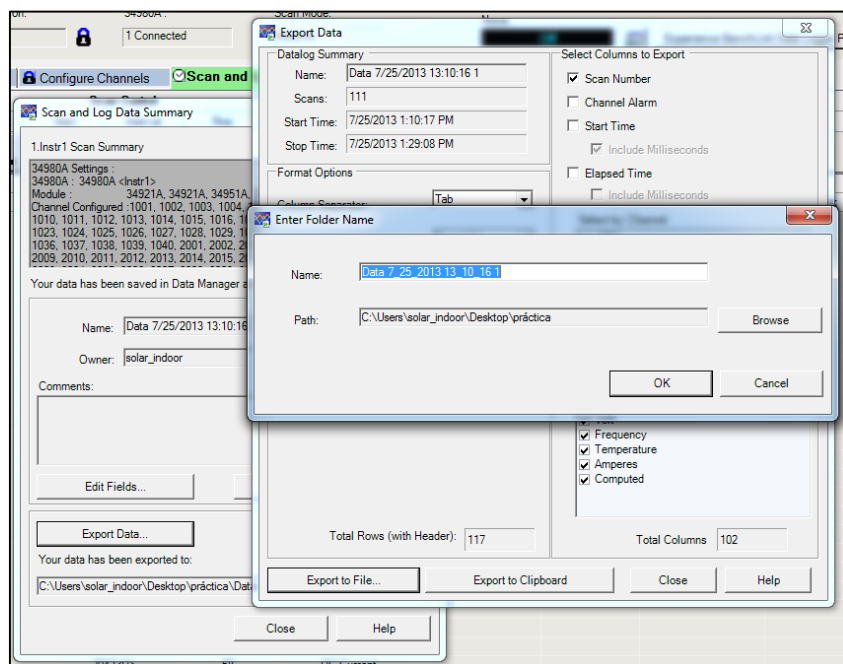


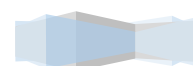
Figura 71: Ventanas *Export Data* y *Export to File* que van apareciendo a la hora de guardar el archivo de datos ensayado.

Establecer consigna para el PID en la temperatura de entrada colectores (EZzone).

Como se ha mencionado con anterioridad, se busca la estabilización de la temperatura de entrada a los colectores en 15°C. Se busca este valor de temperatura porque se quiere que la temperatura media del colector se asemeje lo más posible a la temperatura ambiente y evitar en mayor medida las pérdidas al exterior. Esto depende principalmente de la potencia del ensayo o del caudal. Hay veces que basta con la enfriadora para obtenerla, pero hay otras veces (la mayoría de ellas) que es necesario establecer una consigna a través del PID.

Si se diera este último caso, habría que utilizar el programa “Watlow EZ-ZONE Configurator”. Éste es el software que controla el PID de manera remota para que el PID haga las veces de controlador de la temperatura de entrada a través de las sondas de temperatura instaladas en esta zona.

Al clicar en el icono que corresponde con el software mencionado se visualizará en la pantalla un escaneo que realiza inicialmente el programa para encontrar todos los elementos conectados a él. En la instalación presente únicamente se encuentra conectado



el PID, por lo que únicamente aparecerá un elemento en la lista. Se puede ver este hecho claramente en la imagen que se muestra (Figura 72)

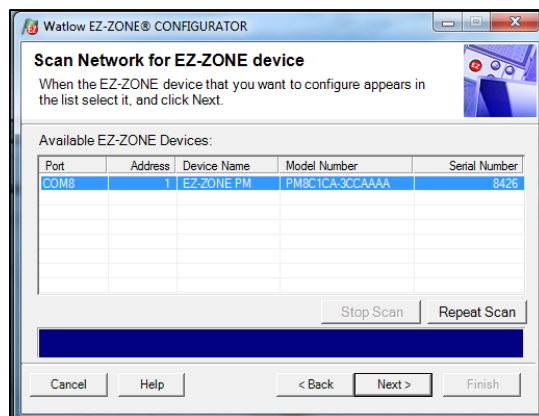


Figura 72: Listado de los elementos manejados con EZ-ZONE.

Aparece en la parte superior de la Figura 72 un aviso que indica que basta con seleccionar el elemento con el que se quiere trabajar y presionar *Next* para acceder a él.

Una vez seleccionado el elemento, se visualiza la página principal de “Watlow EZ-ZONE” (Figura 73). Aparece en la parte izquierda un menú cuyas opciones y subopciones están posicionadas mediante un esquema tipo árbol. Conforme se selecciona la opción que se desee se abren el resto de subopciones a la vez que el aspecto de la pantalla de la parte derecha cambia. Esta pantalla permite variar los datos y proporciona información sobre las variables que se están midiendo.

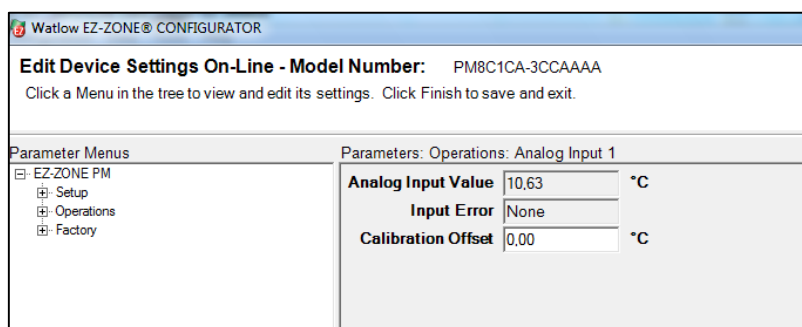
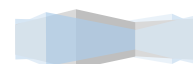


Figura 73: Inicio del programa EZ-ZONE operando con el PID seleccionado

En los ensayos practicados en este proyecto se han ido variando las temperaturas de entrada a las que se pretendía que llegara cada uno de los colectores, mientras se han ido estudiando los coeficientes proporcionales, derivativos e integrales pertenecientes al PID más óptimos a la temperatura buscada.



Dentro de las tres opciones presentes en el menú, se va a trabajar principalmente con la pestaña *Operations*. Esta opción presenta a su vez las opciones que se aprecian en la Figura 74.

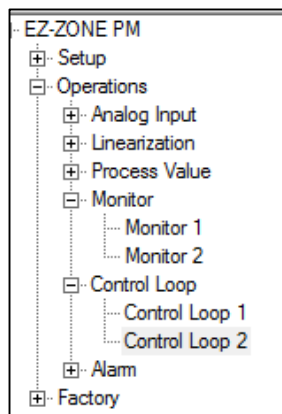
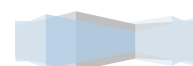


Figura 74: Ramas del menú Operations

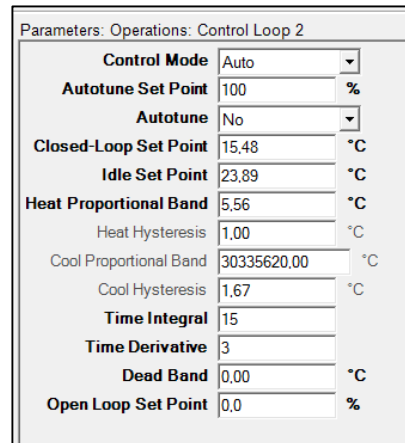
Se encuentran desdobladas las opciones *Monitor* y *Control Loop* porque son las que se han utilizado durante los ensayos y que van a ser descritas. El número 1 y 2 que apellida cada rama del árbol se refiere a cada colector. Así, por ejemplo, *Monitor 1* indica los datos del *colector 1*.

Cuando haya transcurrido un tiempo suficiente en el que se supone que la temperatura de entrada debe haberse estabilizado y no lo ha hecho (tiempo que depende de cada ensayo pero que suele ser mínimo 40 minutos y máximo 2 horas y media), es necesario que el PID intervenga pues es probable que la temperatura no se estabilice. Para ello, se ha de estudiar el valor que está midiendo la sonda de temperatura en el momento y estimar, teniendo en cuenta que la progresión de subida o bajada de temperatura a través del PID no es lineal, los grados a añadir o restar que difieren del valor deseado de temperatura. Esta estimación se hace “a ojo” a base de ir subiendo y bajando el punto al que se quiere llegar.

Para variar el punto de ensayo hay que clicar la rama *Control Loop*. La pantalla de la derecha tendrá la forma de la Figura 75. En ella se visualizan los parámetros que influyen en este proceso. Destacan principalmente a lo largo del ensayo *Closed-Loop Set Point*, *Idle Set Point*, *Heat Proportional Band*, *Time Integral* y *Time Derivative*, es decir, el punto al que se quiere llegar, el punto de la temperatura ambiente y las componentes



proporcional, integral y derivativa del controlador, respectivamente. Basta con introducir el valor estimado del punto de ensayo en la caja *Closed-Loop Set Point* para que el controlador actúe.

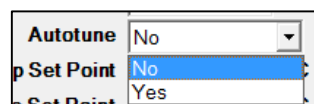


Parameters: Operations: Control Loop 2	
Control Mode	Auto
Autotune Set Point	100 %
Autotune	No
Closed-Loop Set Point	15,48 °C
Idle Set Point	23,89 °C
Heat Proportional Band	5,56 °C
Heat Hysteresis	1,00 °C
Cool Proportional Band	30335620,00 °C
Cool Hysteresis	1,67 °C
Time Integral	15
Time Derivative	3
Dead Band	0,00 °C
Open Loop Set Point	0,0 %

Figura 75: Variables del menú Control Loop

*Hay que tener especial cuidado a la hora de introducir los datos con valores decimales ya que la coma indica la parte decimal pero el punto indica separación entre miles, millones, etc. El poner un punto en vez de una coma provocaría una fuerte subida de la temperatura en la manta que conllevaría unas consecuencias nefastas en la instalación (rotura, quemado, incendio, etc.)

Dentro de *Control Loop* existe el modo *Autotune*. Este modo permite que el controlador PID se autoestabilice alrededor del valor medido justo en el instante de seleccionarlo, es decir, el *Autotune* varía las componentes proporcional, derivativa e integral del PID, reconfigurando el PID para conseguir el objetivo. Se utiliza generalmente una vez que, por mucho que se estime el punto de trabajo el controlador no consigue estabilizar la sonda en torno a él de manera estable. En los ensayos que trata este proyecto se ha realizado un *Autotune* en aquellos más difíciles de nivelar como han sido los de caudal de 27kg/h y de 150kg/h, los de menor y mayor caudal.



Autotune	No
Autotune Set Point	No
Autotune Set Point	Yes

Figura 76: Opción Autotune dentro del menú Control Loop

Si lo que se pretende es visualizar el punto en el que se encuentra la sonda en el momento y compararlo con el punto de ensayo deseado se utiliza la rama *Monitor*. Al clicar dicha



opción aparece en la pantalla de la derecha una serie de parámetros. Así, *Process Value Active* se refiere al dato que se está midiendo en el momento, y *Closed-Loop Set Point* es el dato que se ha introducido en el programa, el punto de ensayo.

Parameters: Operations: Monitor 2		
Control Mode Active	Auto	
Heat Power	16,3	%
Cool Power	0,0	%
Closed-Loop Set Point	15,48	°C
Process Value Active	15,49	°C

Figura 77: Parámetros dentro del menú Monitor

Aparecen también en esta opción los valores *Heat Power* y *Cool Power* que se refieren al poder calorífico en % que existe durante el proceso. La caja *Control Mode Active* indica si el PID se encuentra en modo manual o automático.

Resumiendo, se trata de ir modificando el punto de ensayo hasta conseguir estabilizar la temperatura de entrada a los colectores en 15°C (se consigue visualizar en la opción gráfica de “Benchlink Data Logger”) prestando especial atención a que el PID no se desconfigure, y en tal caso haya que realizar un *Autotune*.

Conexión automática de la enfriadora a través de “Denkovi Relay Manager”.

La máquina frigorífica tiene la opción de ser controlada mediante el ordenador a través de su conexionado a una tarjeta de relés. Esta tarjeta de relés se manipula a través de un software llamado “Denkovi Relay Manager”.

El proceso para controlar el encendido y apagado de la enfriadora automáticamente es el siguiente:

Al encender el software es necesario seleccionar la tarjeta de relés con la que se quiere trabajar. En esta instalación se dispone de una tarjeta de cuatro relés con cuatro puertos usb por lo que habrá que seleccionar dicha tarjeta. Para hacerlo, hay que desplegar la opción *Select device type* situada en la esquina inferior derecha de la pantalla principal



del programa, y escoger el tipo que se precise, en nuestro caso *4 Relay Brd USB* (Figura 78).



Figura 78: Selección del tipo de tarjeta de relés que controlan la máquina frigorífica

A continuación se ha de abrir un nuevo trabajo pulsando la tecla *New* situada justo debajo de la selección del tipo de tarjeta. Seguidamente hay que ejecutar el comando clicando en la opción *Open* dentro de *Device settings* a la izquierda de la opción anterior.

Hay que prestar especial atención a que la opción *Device status* (debajo de *Device settings*) cambia del color amarillo, que indica desactivado, al color verde que indica que el comando se está ejecutando correctamente, tal y como se aprecia en la Figura 79.

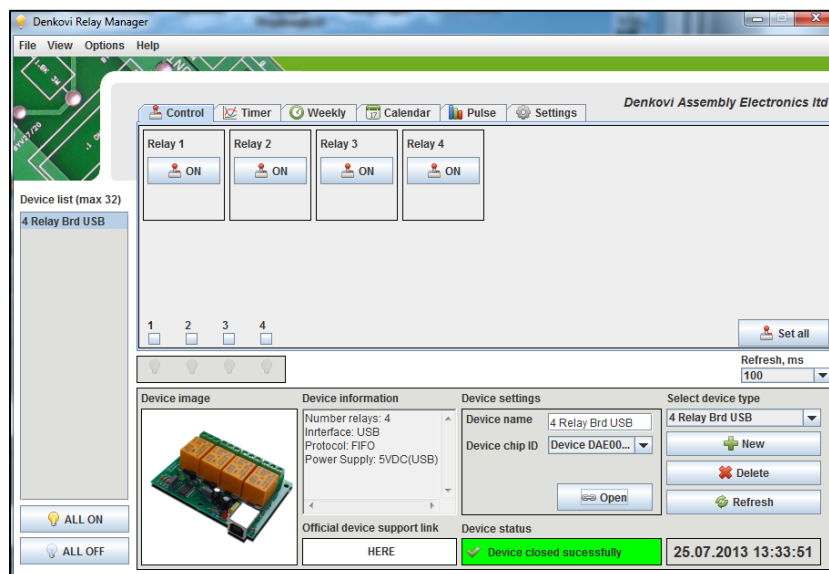
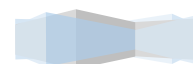


Figura 79: Ventana principal del software Denkovi Relay Manager donde la tarjeta de relés seleccionada está ejecutada correctamente (color verde)

Finalmente falta conectar la enfriadora. Ésta se encuentra conectada en el relé número 1. Para conectar-desconectarla basta con clicar ON-OFF en el relay atribuido. En la Figura 80 que se muestra se aprecia cómo se encuentra conectado el relay 1 y el resto desconectados.



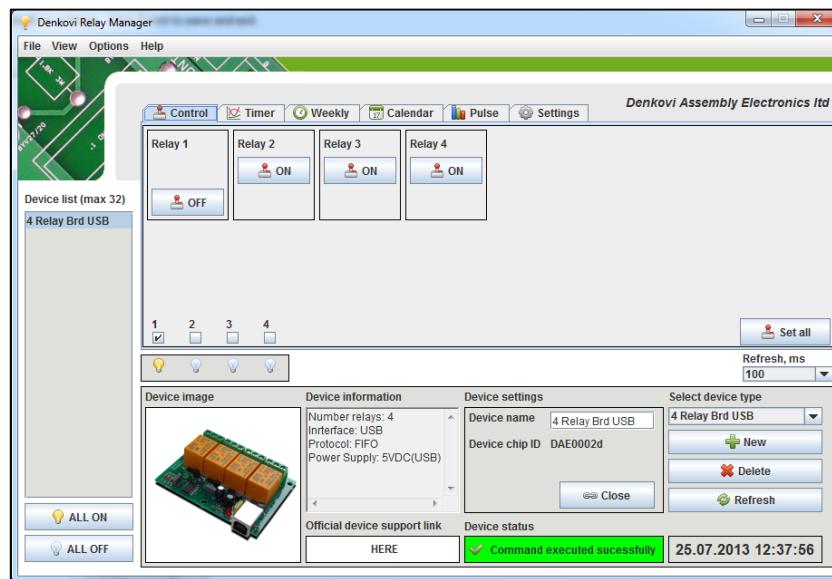


Figura 80: Activación del relé número 1 a través del cual se enciende la máquina frigorífica

Para desconectar el ensayo únicamente habría que clicar en la opción *Close* existente en *Device settings* (Figura 81).

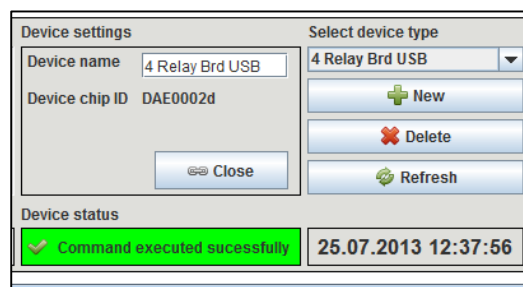


Figura 81: Opción Close en Device Settings situado en la parte inferior derecha de la ventana del software



2.3.4 PRESURIZADO, DESPRESURIZADO Y PURGADO DEL CIRCUITO.

En primer lugar se procede al cierre del circuito y el conectado de los manguitos de entrada y salida a cada uno de los tres tubos de cobre mediante unas bridas instaladas en dichos manguitos. Se debe comprobar que estas bridas están correctamente apretadas para evitar cualquier tipo de fuga de fluido. A continuación, se abre la válvula de entrada de fluido al circuito que se encuentra en la impulsión de la bomba de llenado y se da corriente a la máquina centrífuga por medio de un interruptor que ésta posee en uno de sus laterales. La bomba de llenado en funcionamiento llenará el circuito de fluido desde un tanque conectado a la aspiración y presurizará el circuito en un rango entre 2 y 2,5 bares aproximadamente. Una vez se ha alcanzado esta presión se cierra la válvula que se encuentra después de la impulsión, en la entrada al circuito, e inmediatamente después se apaga la bomba mediante el mismo interruptor. Al haber cerrado la válvula de entrada el fluido queda en el interior a la presión mencionada.

Sin embargo, este sistema de llenado hace que en el interior queden atrapadas grandes cantidades de burbujas de aire que falsean las medidas de presión e impiden el correcto funcionamiento de la bomba. Por lo tanto, es muy importante llevar a cabo un correcto y minucioso purgado del circuito que permita la toma de unas medidas precisas.

En primer lugar se ha de abrir a la mitad las dos válvulas de purgado que conectan con el exterior los puntos de toma de la medida de presión. Al abrir estas válvulas comenzará a salir el fluido de ensayo con grandes cantidades de aire de manera que se mantendrán abiertas el tiempo necesario hasta que el fluido que está saliendo del circuito no posea burbujas de aire.

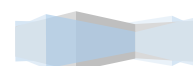
Una vez que ha dejado de salir aire se cierran las válvulas y se conecta la bomba circuladora de caudal a la mitad de su régimen de giro. Esto es, inducir una tensión de 5V desde el sistema de control hasta los bornes 0 y L del variador de frecuencia o de manera manual seleccionar una frecuencia de 25 Hz. Se deja la bomba circuladora funcionando y moviendo caudal a través de los tubos un par de minutos aproximadamente de tal manera que suban a la parte superior del circuito las burbujas de aire que han podido quedar atrapadas en algún punto del interior.



2.3.5 PROCEDIMIENTO DE CAMBIO DE FLUIDO.

El procedimiento a seguir cada vez que se precise cambiar de fluido, por tanto, es el siguiente:

- En primer lugar hay que vaciar completamente la instalación, sacando incluso las tuberías de salida de los caudalímetros efecto Coriolis y haciendo funcionar la bomba para desalojar el caudal en la sección más baja de la instalación (plano donde se encuentra dichos caudalímetros entre otros elementos).
- Una vez vaciada y antes de introducir el nuevo fluido, es necesario hacer una limpieza con el fluido con el que se va a trabajar a continuación. La razón es que aunque se haya vaciado correctamente la instalación, siempre queda fluido residual en volúmenes muertos que más adelante provocaría cambio en las propiedades del fluido que se introduce seguidamente. La solución es llenar, o hacer circular con el fluido con el que se quiere trabajar para "limpiar" y una vez que el residuo o volumen muerto que se tiene es del fluido con el que se va a trabajar, ya se puede llenar completamente, sin miedo a que las propiedades cambien.



3. ENSAYOS Y RESULTADOS.

3.1. CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DEL NÚMERO DE NUSSELT DEBIDA A LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA.

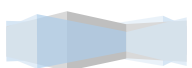
3.2. ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR A LO LARGO DEL TUBO.

3.3. ENSAYOS DE FRICCIÓN.

3.4. ENSAYOS DE CALOR.

3.5. COMPARATIVA: NÚMERO DE NUSSELT. TODOS LOS DISPOSITIVOS.





3 ENSAYOS Y RESULTADOS.

3.1 CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DEL NÚMERO DE NUSSELT DEBIDA A LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA.

El número de Nusselt ha sido obtenido a través de la siguiente expresión:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} = \frac{q''}{T_p - T_f} \cdot \frac{D}{k} \text{ con } q'' = \frac{q}{S} = \frac{V \cdot I}{\pi DL}$$

$$Nu = \frac{V \cdot I}{\pi DL \cdot (T_p - T_f)} \cdot \frac{D}{k} = \frac{1}{\pi Lk} \cdot \frac{V \cdot I}{(T_p - T_f)}$$

Mediante la siguiente ecuación se puede calcular la incertidumbre del número de Nusselt debida a los instrumentos de medida:

$$u_{Nu}^2 = \left(\frac{\partial Nu}{\partial \dot{V}} \right)^2 u_{\dot{V}}^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial I} \right)^2 u_{I}^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_p} \right)^2 u_{T_p}^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_f} \right)^2 u_{T_f}^2$$

La influencia sobre la incertidumbre de la longitud L y de la conductividad térmica k se consideran despreciables y por lo tanto no se tienen en cuenta.

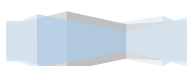
Derivando parcialmente la expresión correspondiente al cálculo del número de Nusselt respecto a las magnitudes de las que ésta depende, se obtienen cada una de las expresiones que a continuación se presentan

$$\frac{\partial Nu}{\partial \dot{V}} = \frac{1}{\pi Lk} \cdot \frac{I}{(T_p - T_f)}$$

$$\frac{\partial Nu}{\partial T_p} = -\frac{1}{\pi Lk} \cdot \frac{V \cdot I}{(T_p - T_f)^2}$$

$$\frac{\partial Nu}{\partial I} = \frac{1}{\pi Lk} \cdot \frac{V}{(T_p - T_f)}$$

$$\frac{\partial Nu}{\partial T_f} = \frac{1}{\pi Lk} \cdot \frac{V \cdot I}{(T_p - T_f)^2}$$



Sustituyendo en la expresión general cada término anterior se obtiene la expresión que calcula la incertidumbre del número de Nusselt debido a las incertidumbres de las magnitudes principales:

$$u_{Nu} = \frac{1}{\pi L k} \sqrt{\left(\frac{I}{(T_p - T_f)}\right)^2 u_v^2 + \left(\frac{V}{(T_p - T_f)}\right)^2 u_I^2 + \left(-\frac{V \cdot I}{(T_p - T_f)^2}\right)^2 u_{T_p}^2 + \left(\frac{V \cdot I}{(T_p - T_f)^2}\right)^2 u_{T_f}^2}$$

A continuación se muestran los datos técnicos proporcionados por el fabricante ya que las precisiones de medida de las magnitudes primarias están marcadas por éste:

Medida	Error
Tensión	$\pm 0,04\%$ de la lectura $\pm 0,03\%$ del rango de medida
Intensidad	$\pm 0,3\%$ de la medida
Sondas PT100 $\frac{1}{10}$ DIN Clase B	0,03°C
Termopares tipo T	0,5°C

Tabla 2: Datos técnicos de instrumentación.

Se recuerda que las medidas de caudal se realizaron a través del caudalímetro de efecto Coriolis; las medidas de temperatura de entrada y salida del fluido al captador se obtuvieron a partir de las sondas PT100 instaladas en ambos extremos de la placa solar; a través de los siete termopares instalados alrededor del tubo se adquirieron los datos pertenecientes a la temperatura de pared del tubo como la media de las temperaturas obtenidas por cada termopar; y por último, la temperatura del fluido se logró a través de una expresión entre la temperatura de entrada y de salida del fluido al captador.

Por lo tanto, las precisiones de cada magnitud son las siguientes:

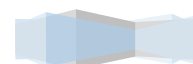
$$u_v = \pm 0,04\% \text{ de la lectura } \pm 0,03\% \text{ del rango de medida; } u_I = \pm 0,3\% \text{ de la medida}$$

$$u_{T_e} = 0,03^\circ\text{C}; u_{T_{px}} = 0,5^\circ\text{C} \text{ y } \bar{T}_p = \frac{\sum_{i=1}^7 T_{px}}{7}$$

$$u_{T_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_p}{\partial T_1}\right)^2 u_{T_1}^2 + \left(\frac{\partial T_p}{\partial T_2}\right)^2 u_{T_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial T_p}{\partial T_7}\right)^2 u_{T_7}^2} = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{7}\right)^2 \cdot 0,5^2\right] \cdot 7} = \frac{u_T}{\sqrt{7}} = 0,189^\circ\text{C}$$

$$T_f = T_e \left(1 - \frac{1610}{1800}\right) + T_s \Rightarrow$$

$$u_{T_f} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_f}{\partial T_e}\right)^2 u_{T_e}^2 + \left(\frac{\partial T_f}{\partial T_s}\right)^2 u_{T_s}^2} = 0,03 \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{1610}{1800}\right)^2 + 1} = 0,0302^\circ\text{C}$$



3.2 ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR A LO LARGO DEL TUBO.

En este apartado se va a proceder a analizar los resultados obtenidos en los ensayos realizados con tubo liso y con elementos insertados a lo largo de los tubos del captador. En primera instancia se obtendrán conclusiones a partir de los datos procedentes de los ensayos llevados a cabo con potencia de la manta de 400W/m^2 , y seguidamente, se procederá a obtener las conclusiones que se desprenden de los ensayos con potencia de la manta de 800W/m^2 .

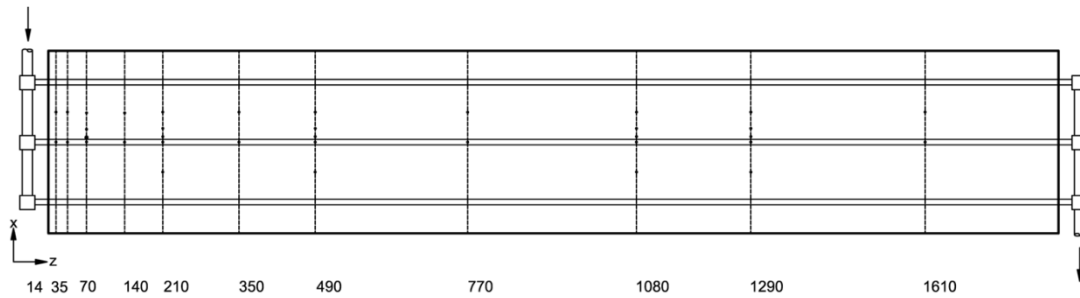


Figura 82 : Esquema del captador solar con las secciones longitudinales sobre las que se ha medido la temperatura.

Para la consecución de los ensayos se han utilizado tres muelles rígidos y tres láminas alabeadas diferentes. Las características geométricas de cada uno se aprecian en la Tabla 3. Una forma común de identificar un muelle es a través de su paso dimensional que es el paso “p” dividido por el diámetro “d”, y de su espesor dimensional, que no es más que el espesor “e” del alambre dividido por el diámetro total “d” (Figura 83).

Los valores para los muelles escogidos para los ensayos de p/d y de e/d son 1.5 y 0.071 para el primer muelle, y 1.07 y 0.2 para el segundo.

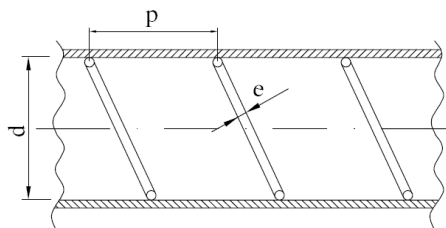


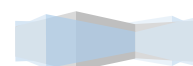
Figura 83: Medidas geométricas de un muelle.



En la Tabla 3 mostrada debajo que pueden ver las diferentes geometrías ensayadas.

<i>TIPO</i>	<i>d (mm)</i>	<i>p (mm)</i>	<i>e (mm)</i>	<i>p/d</i>	<i>e/d</i>	<i>p/e</i>
WC01	7	10,5	0,5	1,5	0,07	21,0
WC02	7	7,5	1,4	1,1	0,20	5,3
WC03	7	7	2	1	0,28	3,5
TT	7	42	0,7	6	0,10	60
TT	7	84	0,7	12	0,10	120
TT	7	126	0,7	24	0,10	180

Tabla 3: Características geométricas de los muelles utilizados en los ensayos.



3.3 ENSAYOS DE FRICCIÓN.

A continuación se muestran todos los ensayos del factor de fricción para cada uno de los casos estudiados. Se mostrará una comparativa para resolver cuales son los más idóneos para instalaciones de captadores solares.

➤ ENSAYOS DE FRICCIÓN PARA TUBO LISO.

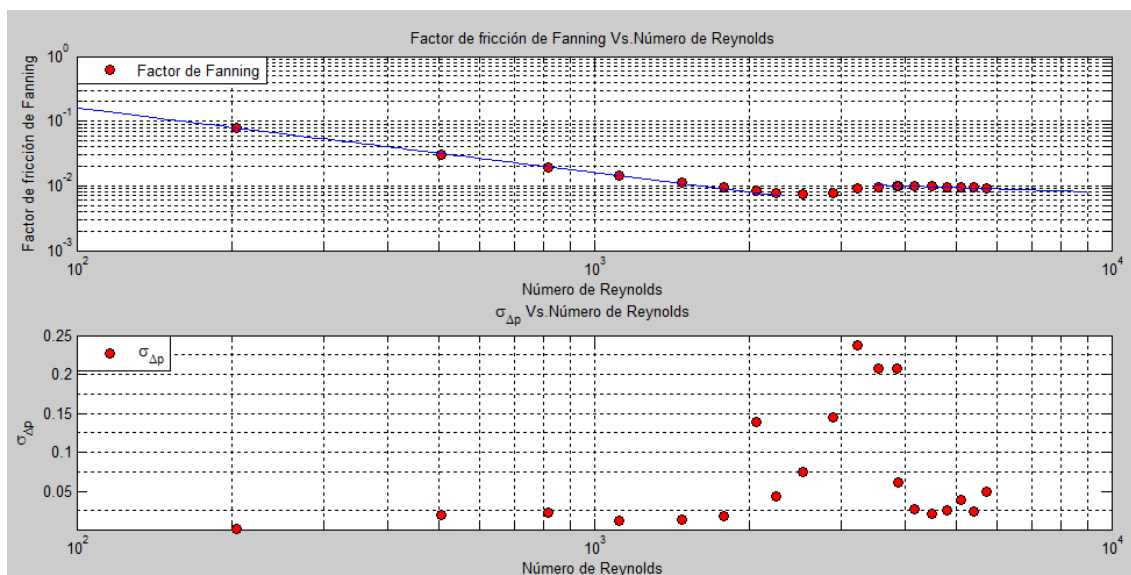


Figura 84: Factor de fricción de Fanning Vs. Reynolds. $\Delta\delta p$ Vs. Reynolds.

➤ ENSAYOS DE FRICCIÓN PARA LÁMINAS DE PASO 42 mm.

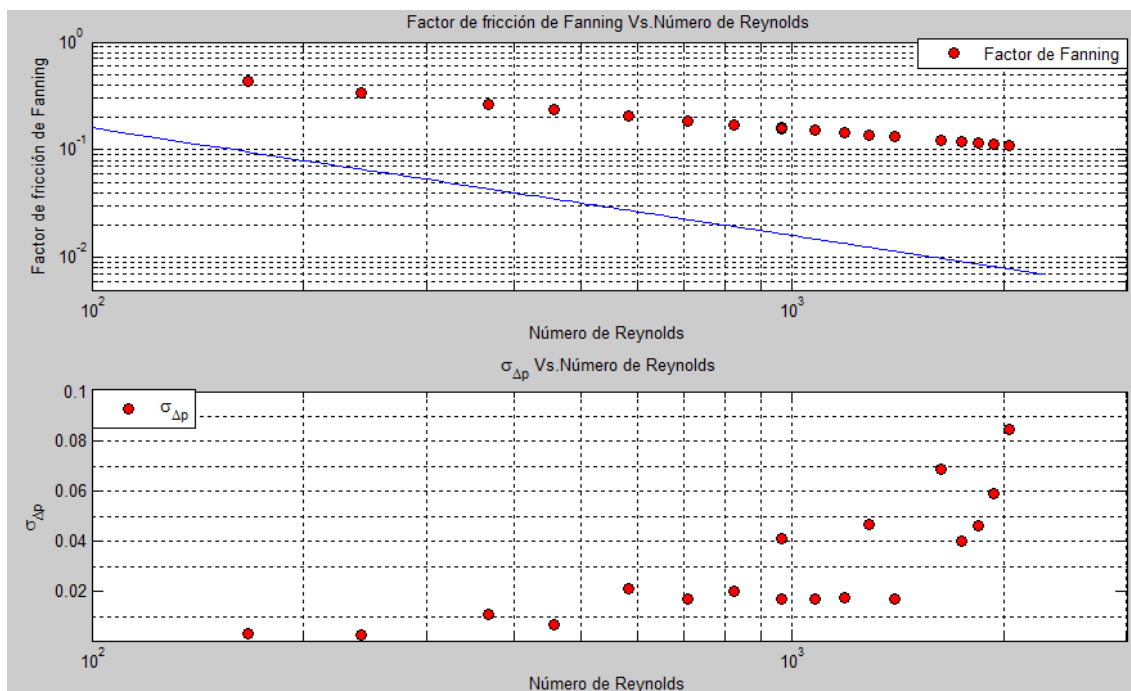


Figura 85: Factor de fricción de Fanning Vs. Reynolds. $\Delta\delta p$ Vs. Reynolds.



➤ ENSAYOS DE FRICCIÓN PARA LÁMINAS DE PASO 84 mm.

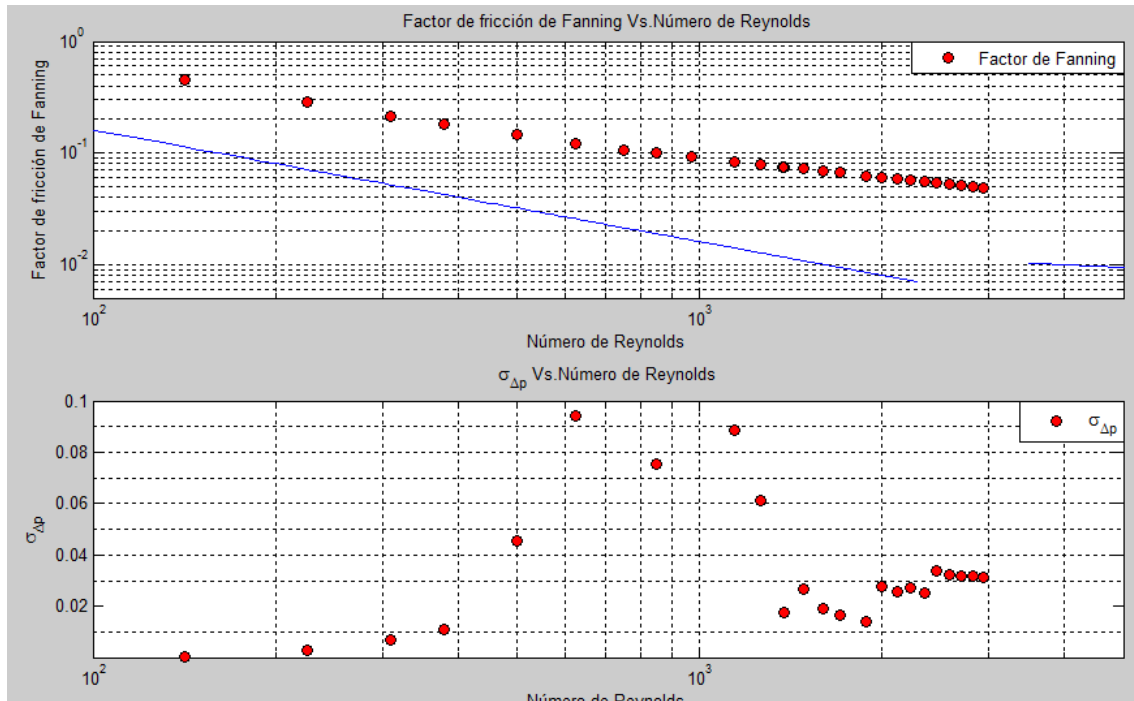


Figura 86: Factor de fricción de Fanning Vs. Reynolds. $\Delta\delta p$ Vs. Reynolds.

➤ ENSAYOS DE FRICCIÓN PARA LÁMINAS DE PASO 126 mm.

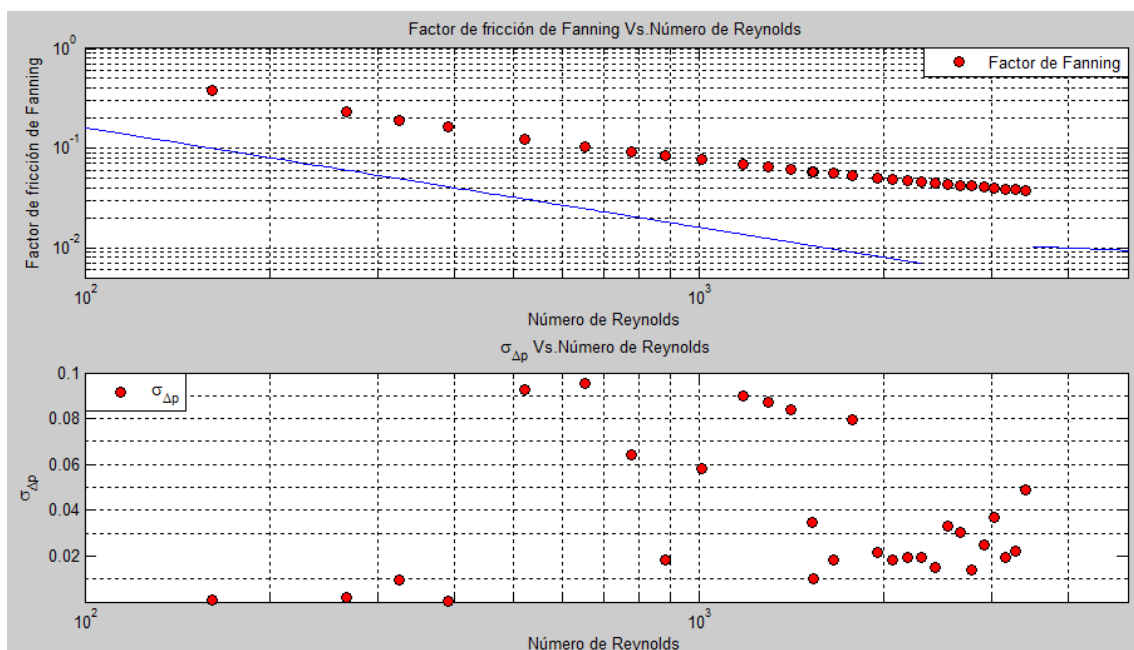


Figura 87: Factor de fricción de Fanning Vs. Reynolds. $\Delta\delta p$ Vs. Reynolds.



➤ ENSAYOS DE FRICCIÓN PARA MUELLE W4A1.

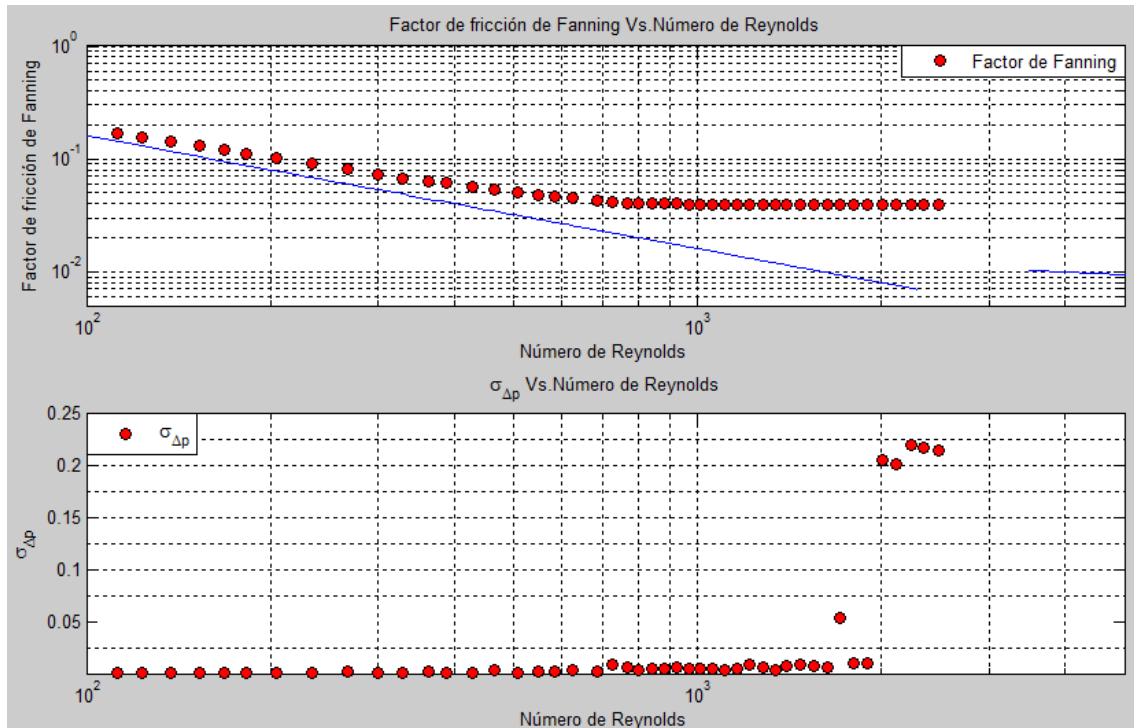


Figura 88: Factor de fricción de Fanning Vs. Reynolds. $\Delta\delta p$ Vs. Reynolds.

➤ ENSAYOS DE FRICCIÓN PARA MUELLE W4AC.

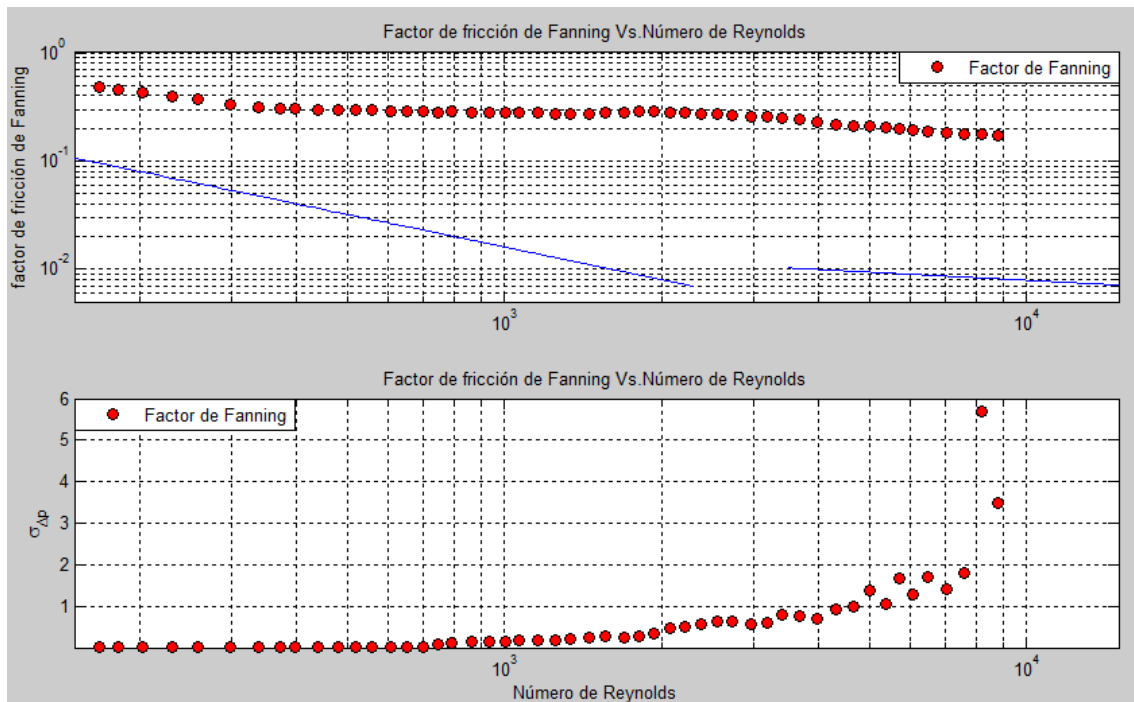


Figura 89: Factor de fricción de Fanning Vs. Reynolds. $\Delta\delta p$ Vs. Reynolds.



➤ ENSAYOS DE FRICCIÓN PARA MUELLE WC03.

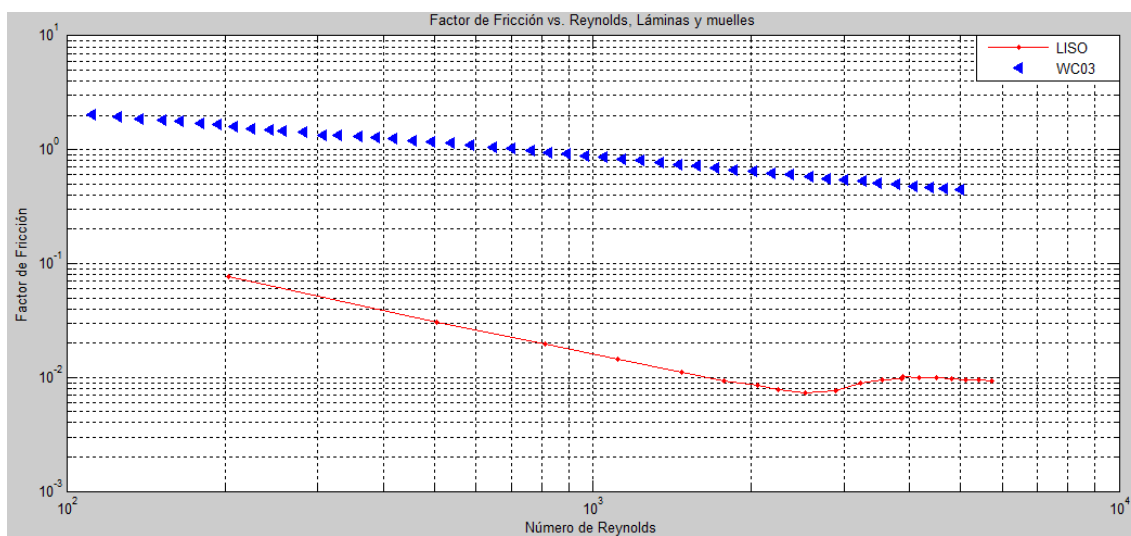
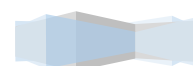


Figura 90: Factor de fricción de Fanning Vs. Reynolds.



3.3.1 ENSAYOS DE FRICCIÓN. DISCUSIÓN.

➤ ENSAYO DE FRICCIÓN PARA LÁMINAS.

Para las láminas ensayadas se puede observar en las figuras tendencias continuas, sin cambios bruscos de tendencias. Las de paso mayor, TT 126 y TT 84 tienen un menor factor de fricción, mientras que para la TT 42 presentan mayores valores de factor de fricción de Fanning. Es de esperar que las dos láminas de paso mayor se comporten de manera similar, entre sí, y diferente a la de TT 42 en su estudio de transferencia de calor.

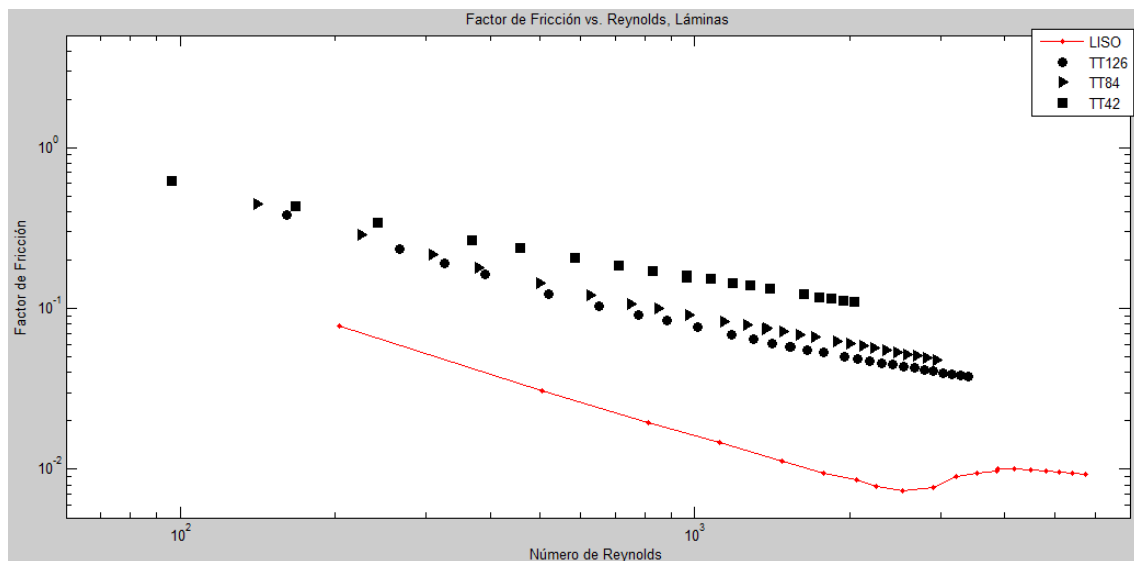


Figura 91: Factor de fricción de Fanning Vs. Reynolds. Láminas

En el estudio del aumento del factor de fricción frente a Reynolds, podemos observar que la lámina TT 42 tendrá un mayor aumento del factor de fricción, llegando a valores cercanos a 14; mientras, para las otras dos láminas de mayor paso tendrán una tendencia mucho menor, cercanos a 5, en cuanto al posible aumento de factor de fricción.

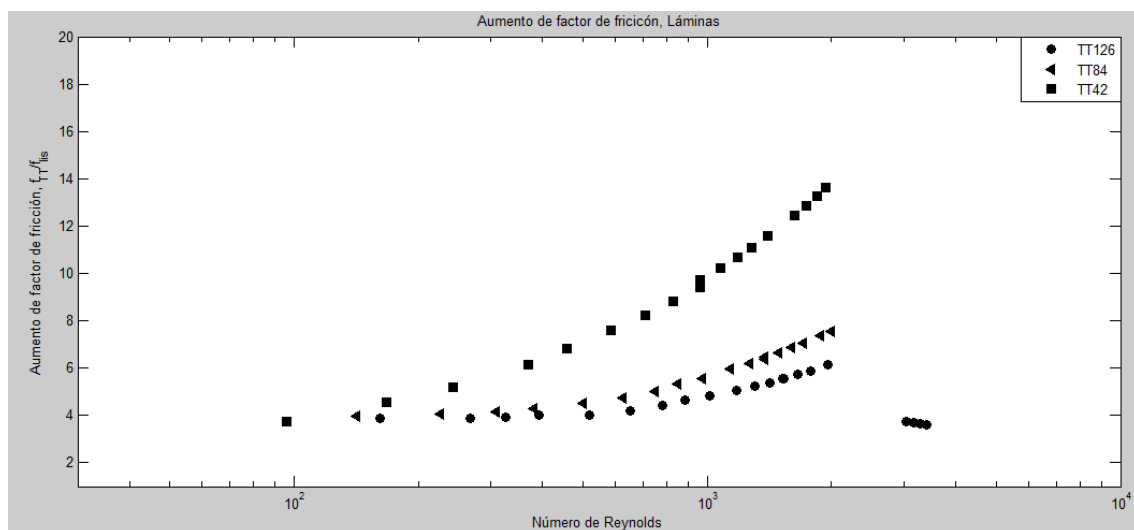


Figura 92: Aumento Factor de fricción de Fanning Vs. Reynolds. Láminas.



➤ ENSAYO DE FRICCIÓN PARA MUELLES.

Para los muelles WC01 y WC03 se puede observar en la figura 93 un cambio de régimen, donde encontramos una tendencia laminar hasta 400 en el número de Reynolds, y, a partir de esos valores, el factor de fricción se hace independiente del número de Reynolds, lo que implica que nos encontramos en régimen turbulento. Para el muelle WC02 el factor de fricción es mayor que los anteriores y no encontramos un cambio de régimen definido.

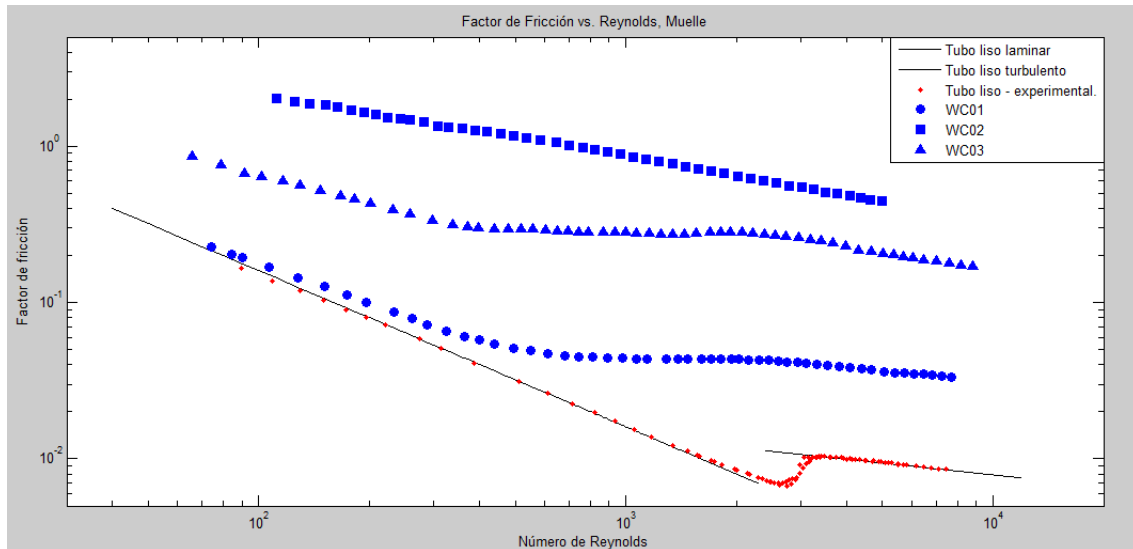


Figura 93: Factor de fricción de Fanning Vs. Reynolds. Muelles.

En el estudio del aumento del factor de fricción frente al número de Reynolds, podemos observar que la lámina WC 03 tendrá un mayor aumento de fricción, llegando a valores cercanos a 80; mientras, los otros dos muelles muestran una tendencia menor comparados con el muelle anterior. El muelle WC02 tiene un aumento de fricción máximo cercano a 35, siendo mayor que todas las láminas estudiadas. Mientras, el muelle WC01 tiene un valor cercano a 5, comportándose en este caso parecido a las láminas TT 126 y TT 84, mostradas anteriormente.

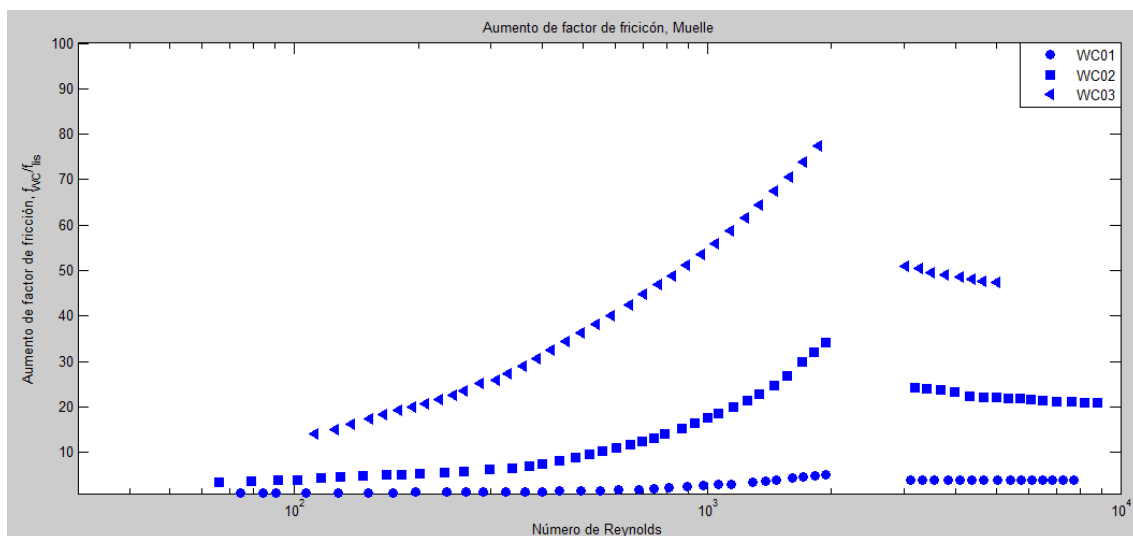
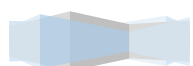


Figura 94: Aumento Factor de fricción de Fanning Vs. Reynolds. Muelles.



➤ ENSAYO DE FRICCIÓN PARA TODOS LOS ENSAYOS.

En la figura 95 se muestran una comparativa de todos los ensayos realizados para el estudio del factor de fricción de Fanning respecto al número de Reynolds.

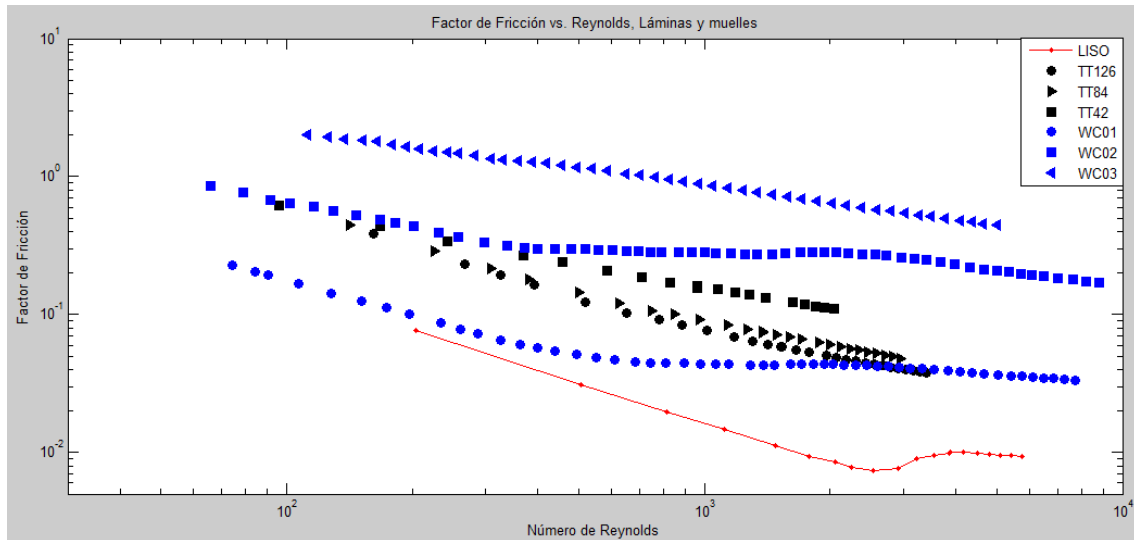
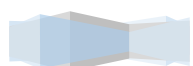


Figura 95: Factor de fricción de Fanning Vs. Reynolds.



3.4 ENSAYOS DE CALOR.

3.4.1 ENSAYO DE CALOR TUBO LISO.

Características:

TIPO	d (mm)	p (mm)	e (mm)	p/d	e/d
LISO	7	∞	0	∞	0

Tabla 4: Característica para tubo liso.

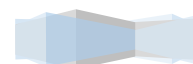
Se han ensayado con dos potencias diferentes: 400 W/m² y 800 W/m². Para cada potencia se ha estudiado la evolución de la temperatura para los caudales siguientes:

Potencia W/m ²	Potencia W	Gasto másico	Potencia W/m ²	Potencia W	Gasto másico
800 w/m2	468 w	150 kg/h	400 w/m2	234 w	150 kg/h
800 w/m2	468 w	96 kg/h	400 w/m2	234 w	96 kg/h
800 w/m2	468 w	63 kg/h	400 w/m2	234 w	63 kg/h
800 w/m2	468 w	41 kg/h	400 w/m2	234 w	41 kg/h
800 w/m2	468 w	27 kg/h	400 w/m2	234 w	27 kg/h

Tabla 5: Ensayos para tubo liso.

Desarrollo de ensayos:

- Cálculo de número de Nusselt frente a la longitud del tubo.
- Cálculo de la temperatura del absorbedor a lo largo del tubo.
- Cálculo de la temperatura en la sección J.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.



G:27 kg/h P:400 w/m²:

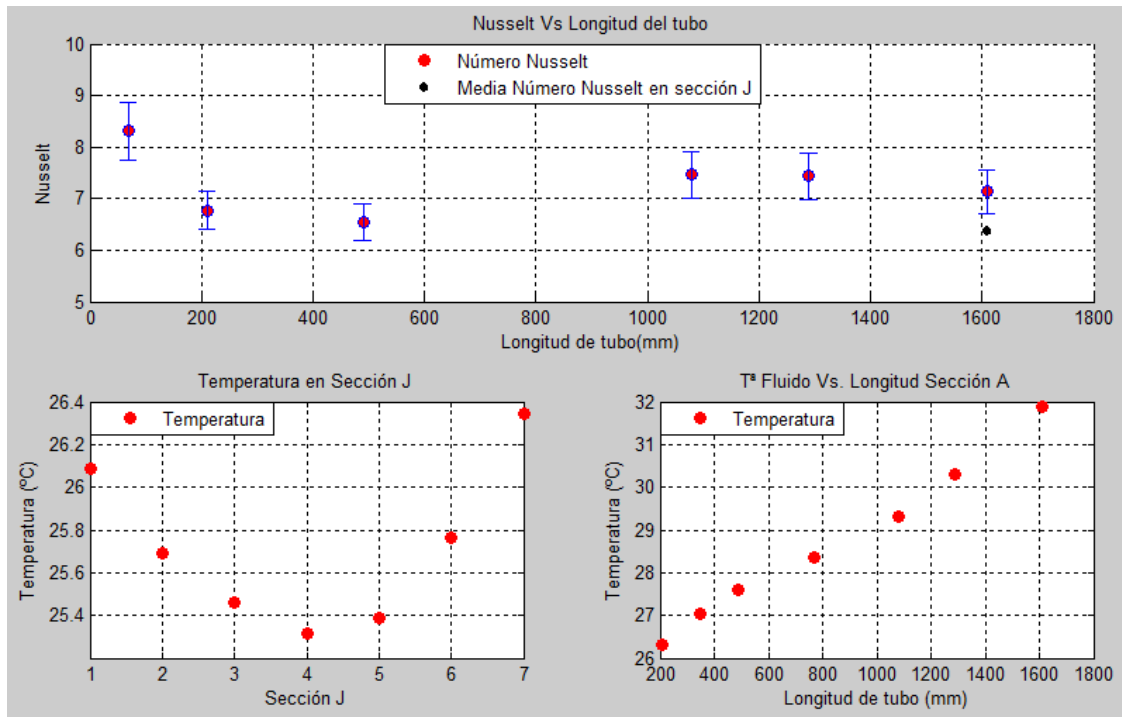


Figura 96: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:27 kg/h P:800 w/m²:

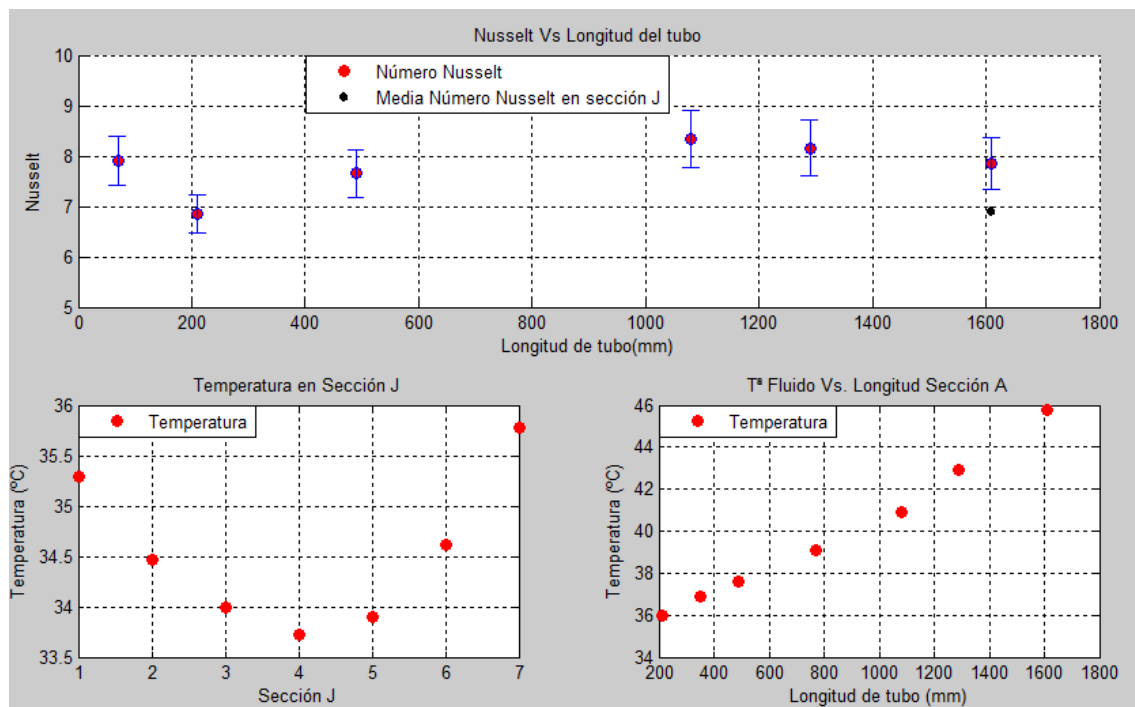


Figura 97: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:41 kg/h P:400 w/m²:

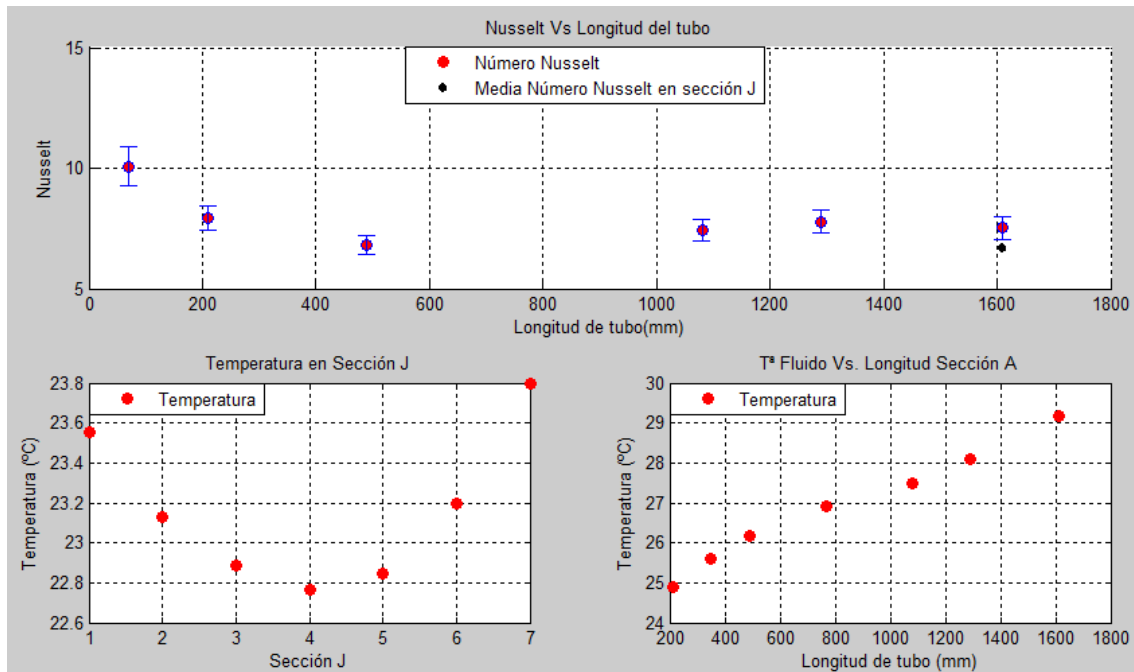


Figura 98: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:41 kg/h P:800 w/m²:

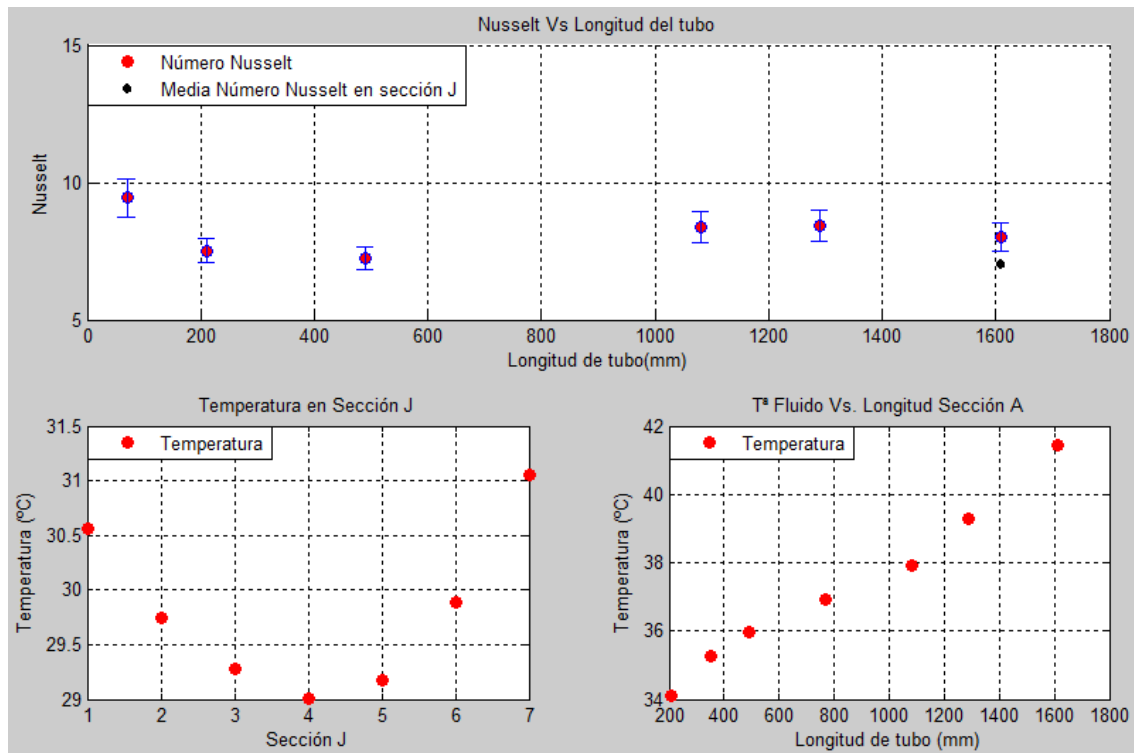
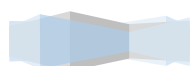


Figura 99: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. a lo largo del tubo.



G:63 kg/h P:400 w/m²:

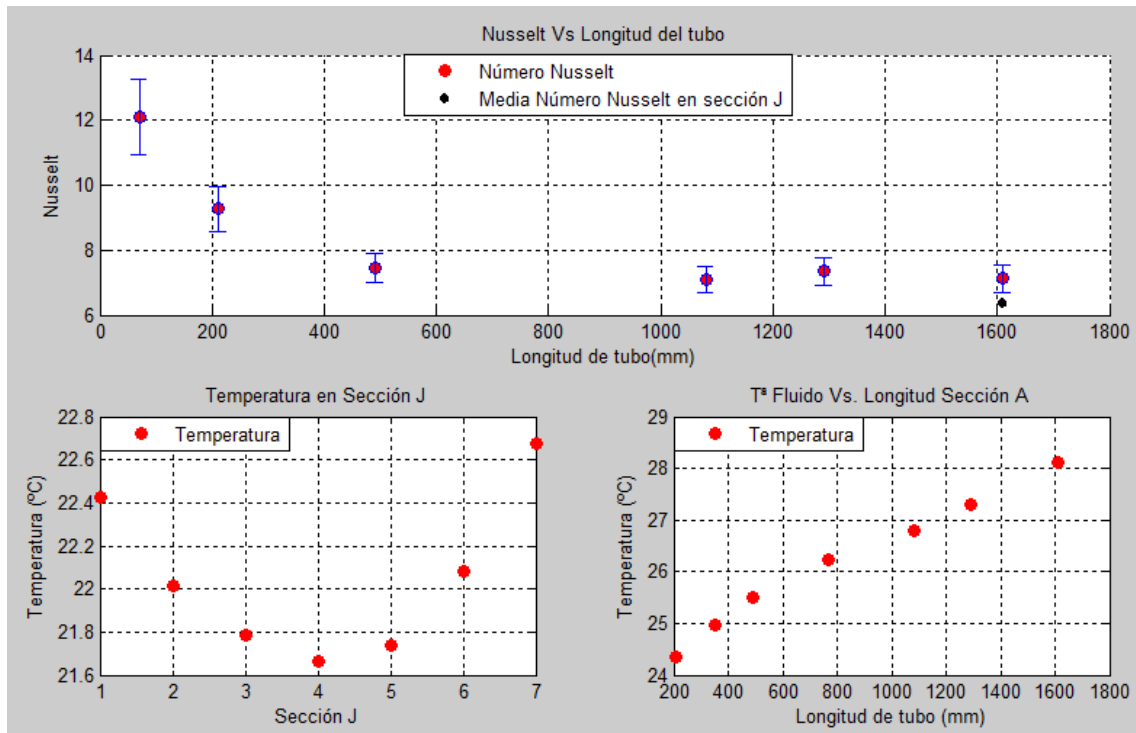


Figura 100: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:63 kg/h P:800 w/m²:

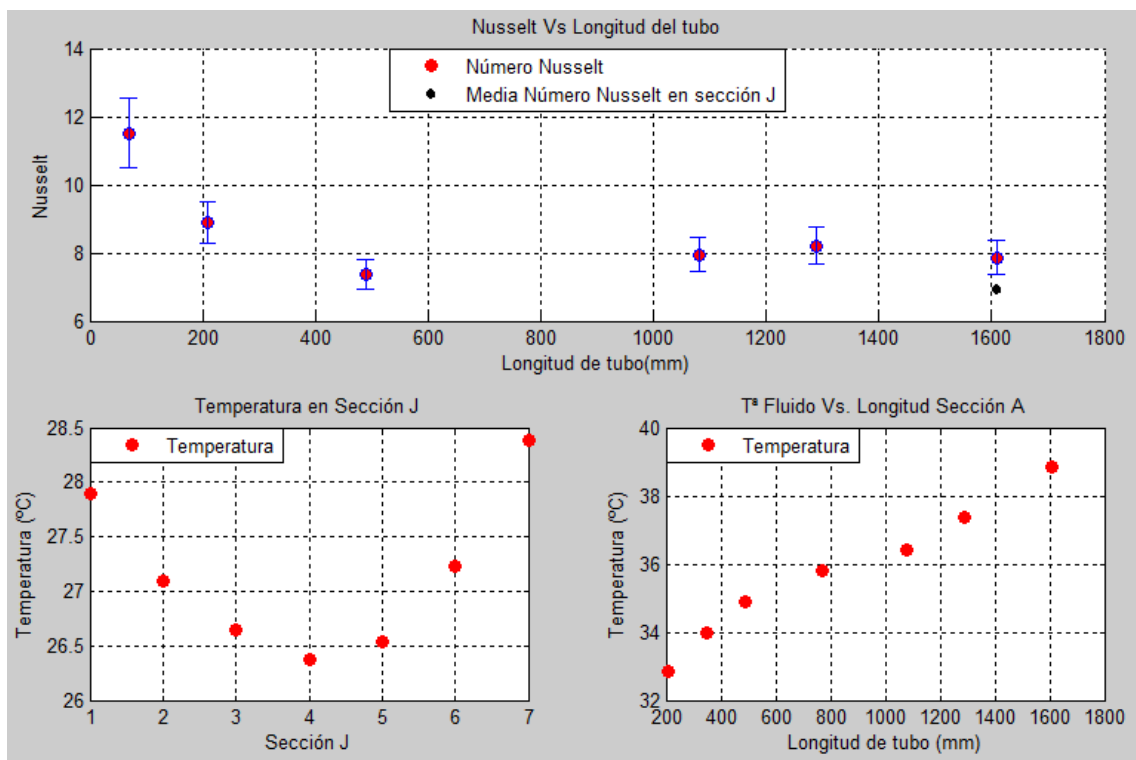


Figura 101: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:96 kg/h P:400 w/m²:

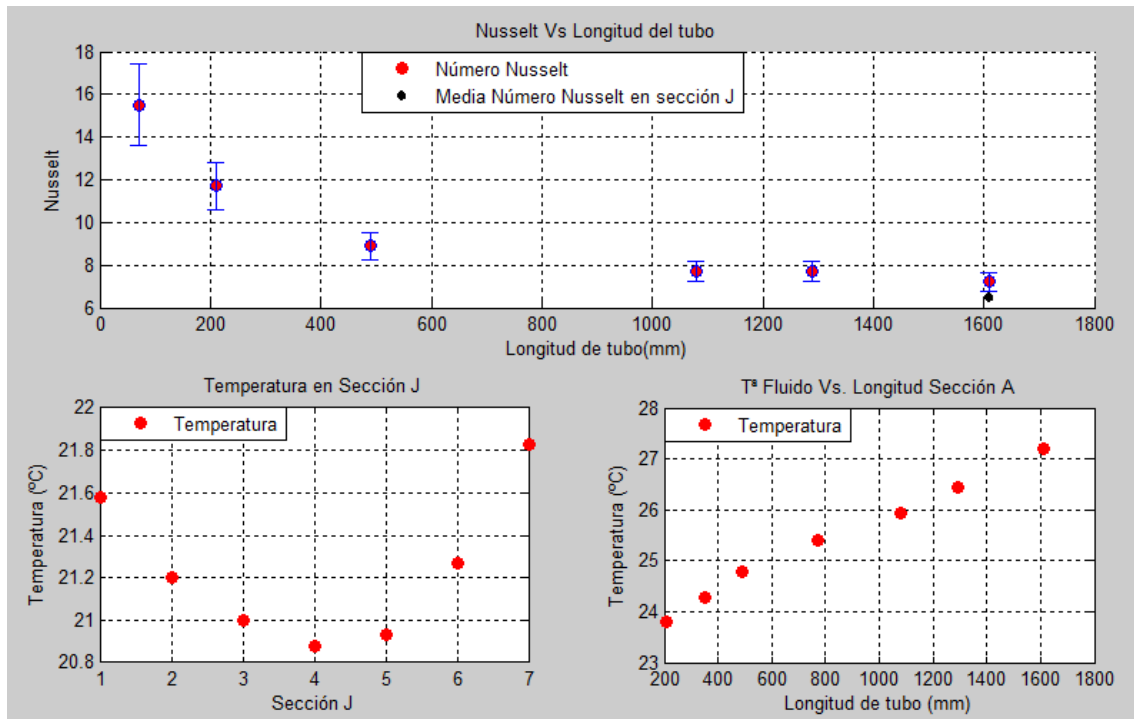


Figura 102: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:96 kg/h P:800 w/m²:

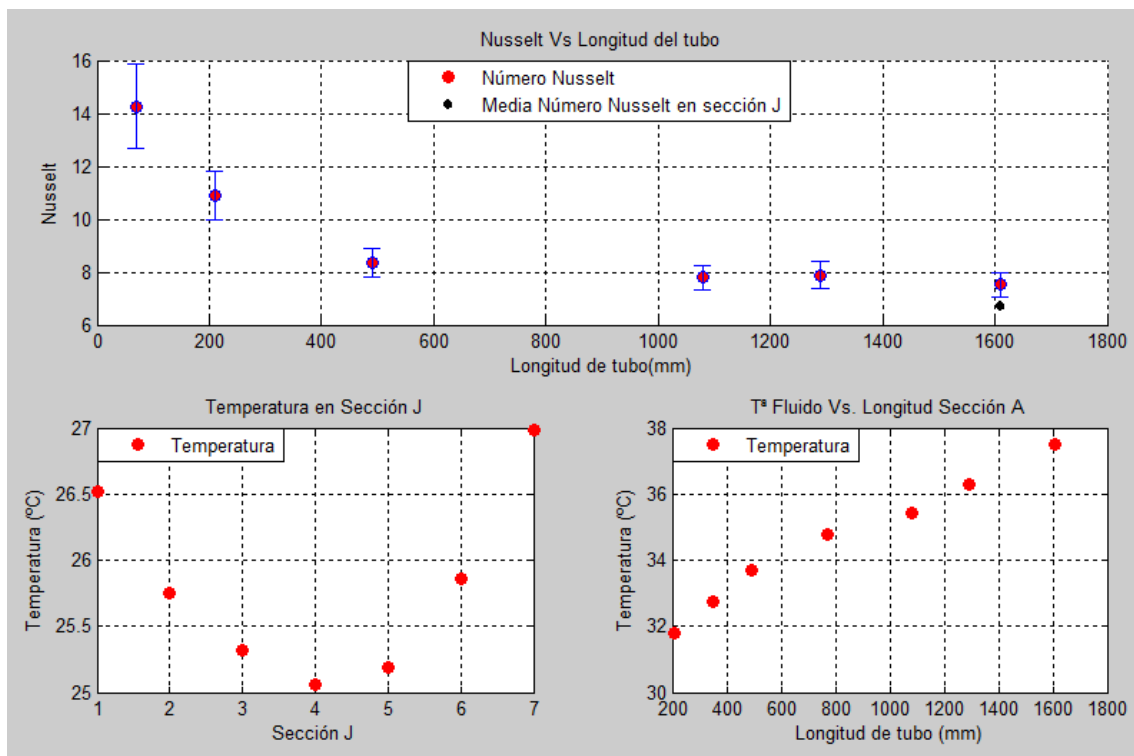


Figura 103: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:150 kg/h P:400 w/m²:

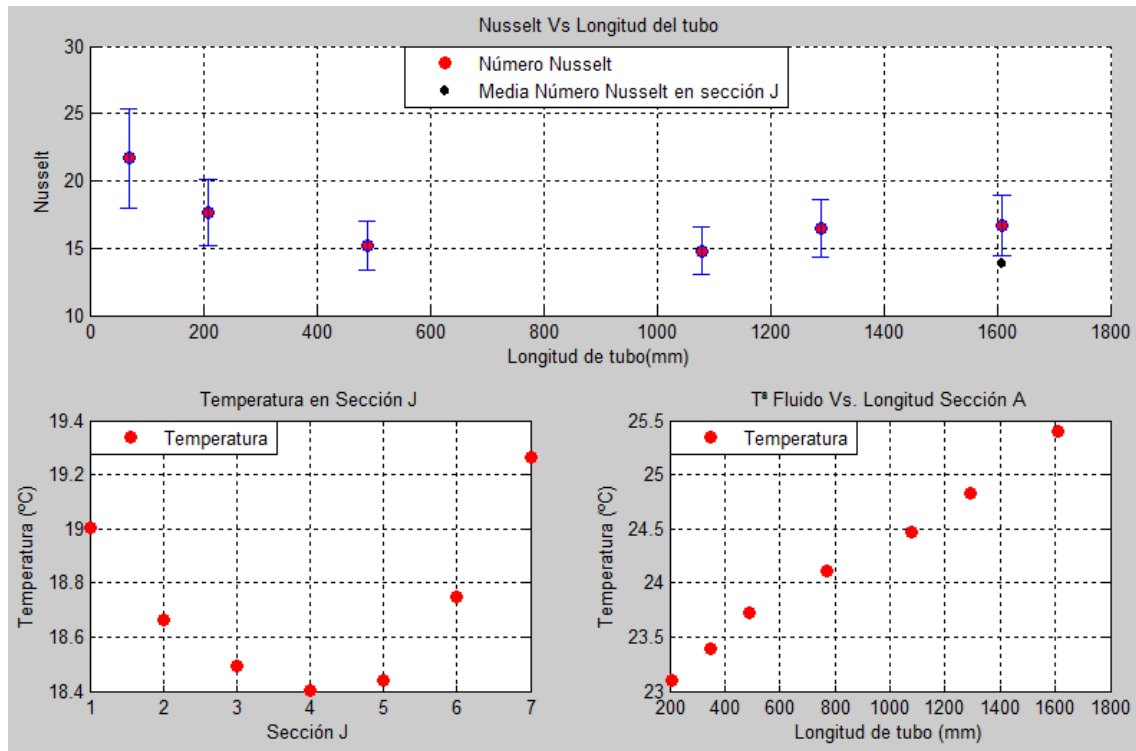


Figura 104: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:150 kg/h P:800 w/m²:

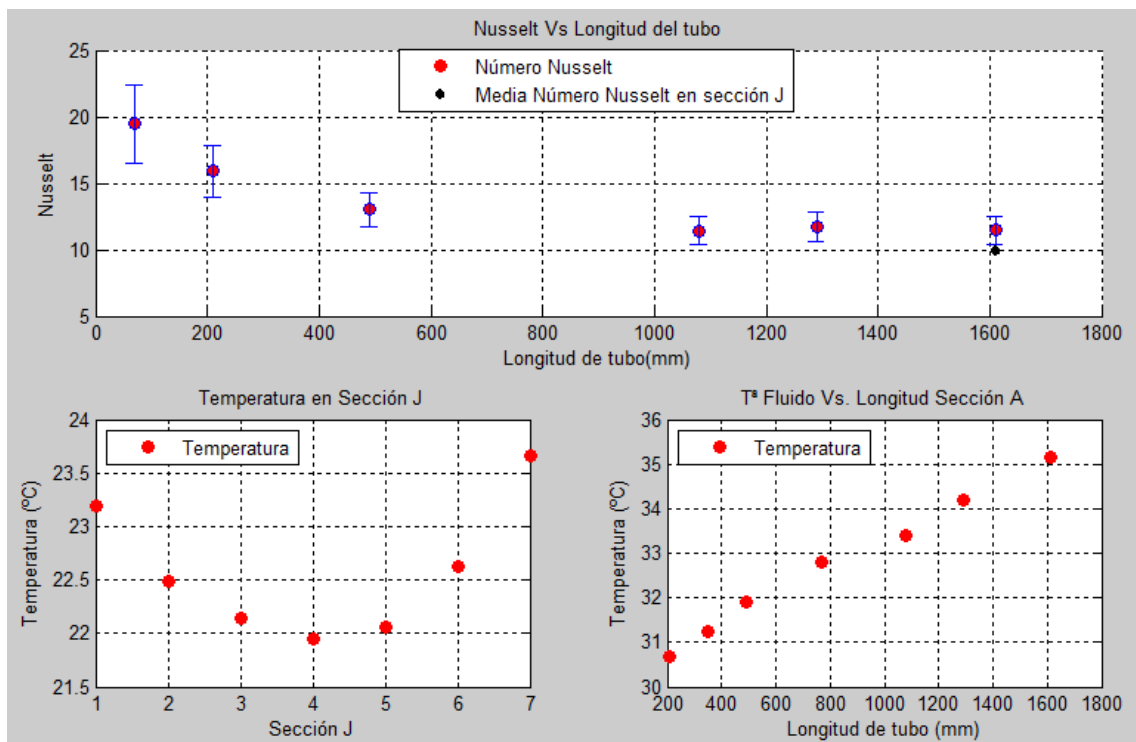


Figura 105: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



ANÁLISIS DE RESULTADOS:

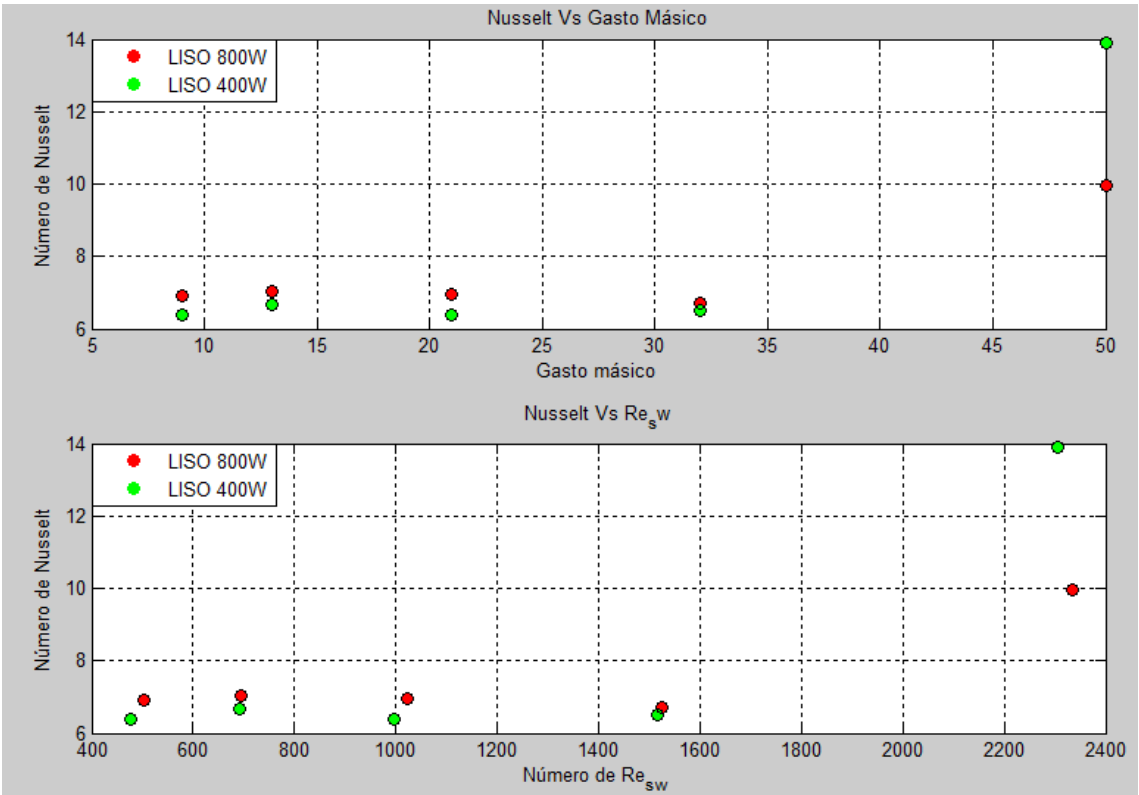


Figura 106: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. $Re_{s,w}$.

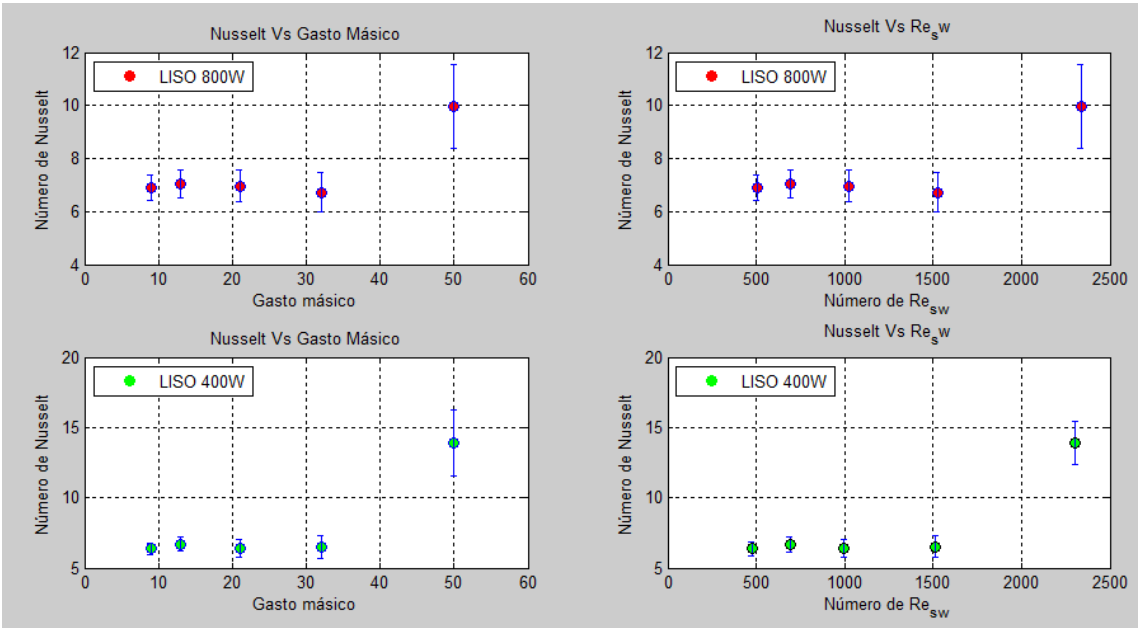


Figura 107: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. $Re_{s,w}$.



➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².

Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	8,311	6,769	6,547	7,463	7,432	7,142
41 kg/h		10,066	7,909	6,823	7,415	7,782	7,518
63 kg/h		12,106	9,270	7,442	7,099	7,349	7,121
96 kg/h		15,510	11,699	8,904	7,699	7,697	7,214
150 kg/h		21,677	17,655	15,191	14,795	16,476	16,672

Tabla 6: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².

➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

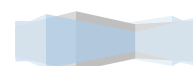
Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	7,907	6,857	7,657	8,343	8,155	7,855
41 kg/h		9,439	7,508	7,225	8,362	8,433	8,028
63 kg/h		11,515	8,890	7,378	7,951	8,212	7,867
96 kg/h		14,262	10,887	8,348	7,789	7,891	7,530
150 kg/h		19,448	15,897	13,004	11,438	11,747	11,454

Tabla 7: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

➤ Nusselt medio en sección J e incertidumbre de Nusselt.

Potencia	LISO 800W/m2				LISO 400W/m2			
Gasto Másico	Nu_HW	uNu_HW	%uNu_HW	Resw_HW	Nu_LW	uNu_LW	%uNu_HW	Resw_LW
27 kg/h	6,899	0,498	7,214	504,141	6,373	0,435	6,821	476,754
41 kg/h	7,052	0,538	7,624	695,253	6,688	0,513	7,664	690,317
63 kg/h	6,964	0,604	8,673	1024,085	6,399	0,589	9,207	996,513
96 kg/h	6,731	0,747	11,101	1525,272	6,514	0,831	12,755	1514,771
150 kg/h	9,967	1,562	15,667	2335,729	13,666	2,348	17,180	2303,748

Tabla 8: Nusselt e incertidumbre de Nusselt.



3.4.2 ENSAYOS TT 42.

Características:

TIPO	d (mm)	p (mm)	e (mm)	p/d	e/d
TT	7	42	0,7	6	0,1

Tabla 9: Característica para TT 42.

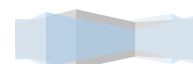
Se han ensayado con dos potencias diferentes: 400 W/m^2 y 800 W/m^2 . Para cada potencia se ha estudiado la evolución de la temperatura para los caudales siguientes:

Potencia W/m^2	Potencia W	Gasto másico	Potencia W/m^2	Potencia W	Gasto másico
800 w/m2	468 w	150 kg/h	400 w/m2	234 w	150 kg/h
800 w/m2	468 w	96 kg/h	400 w/m2	234 w	96 kg/h
800 w/m2	468 w	63 kg/h	400 w/m2	234 w	63 kg/h
800 w/m2	468 w	41 kg/h	400 w/m2	234 w	41 kg/h
800 w/m2	468 w	27 kg/h	400 w/m2	234 w	27 kg/h

Tabla 10: Ensayos para TT 42.

Desarrollo de ensayos:

- Cálculo de número de Nusselt frente a la longitud del tubo.
- Cálculo de la temperatura del absorbedor a lo largo del tubo.
- Cálculo de la temperatura en la sección J.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.



G:27 kg/h P:400 w/m²:

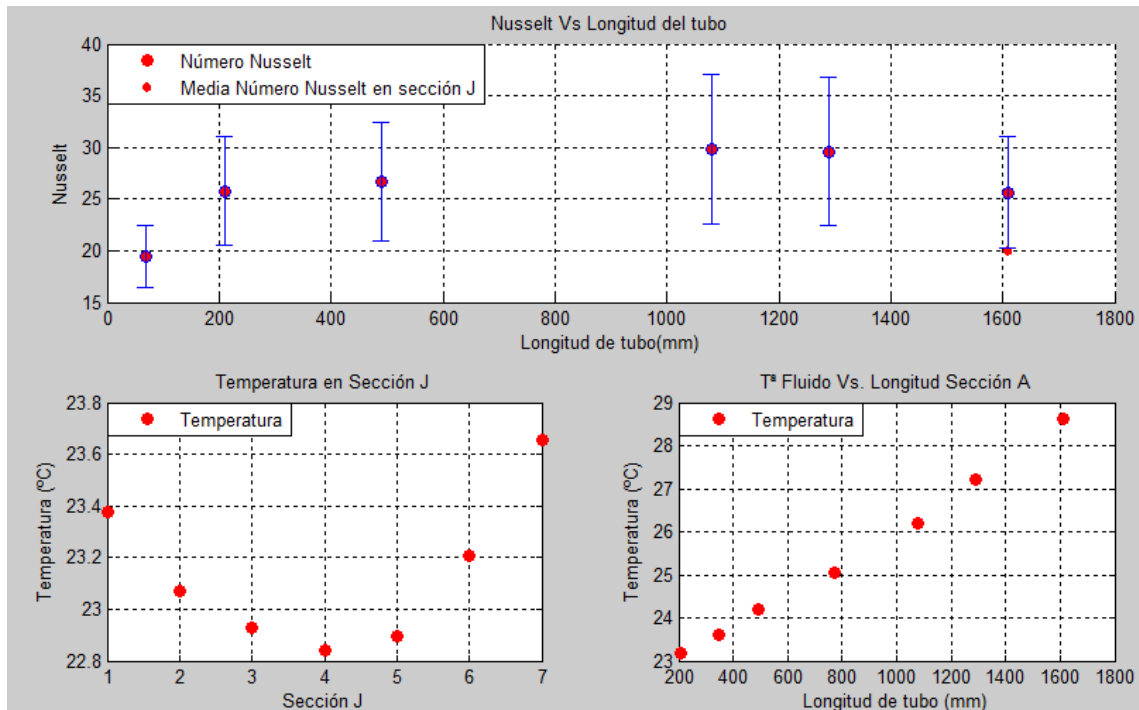


Figura 108: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:27 kg/h P:800 w/m²:

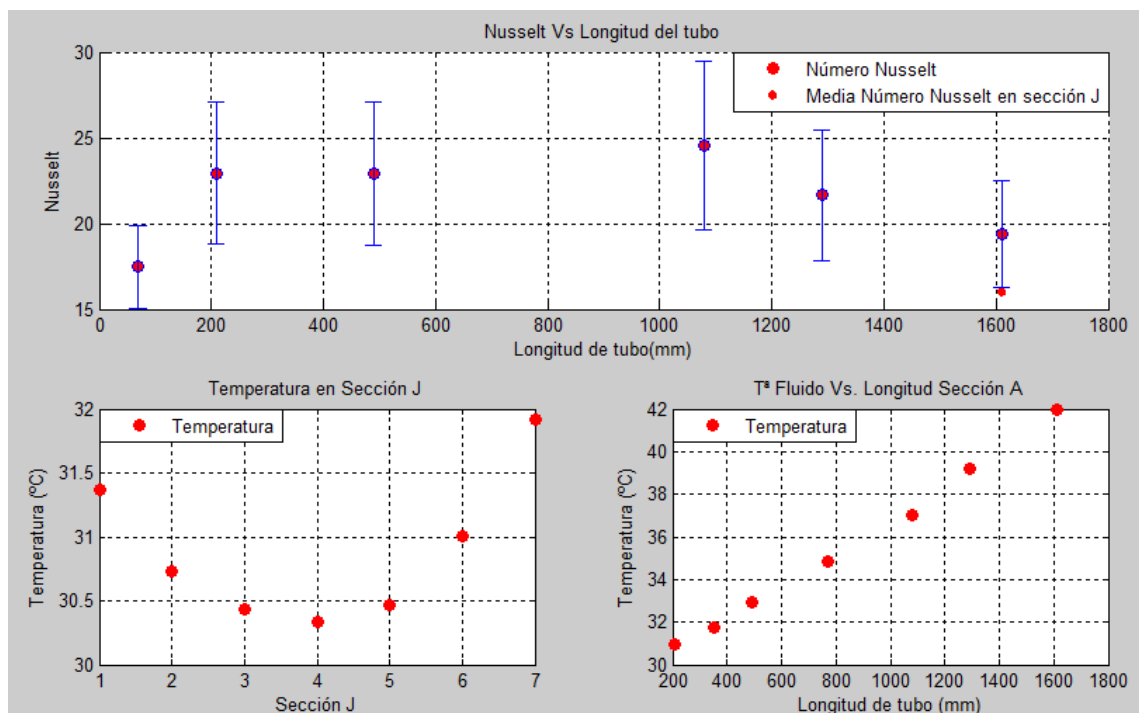


Figura 109: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:41 kg/h P:400 w/m²:

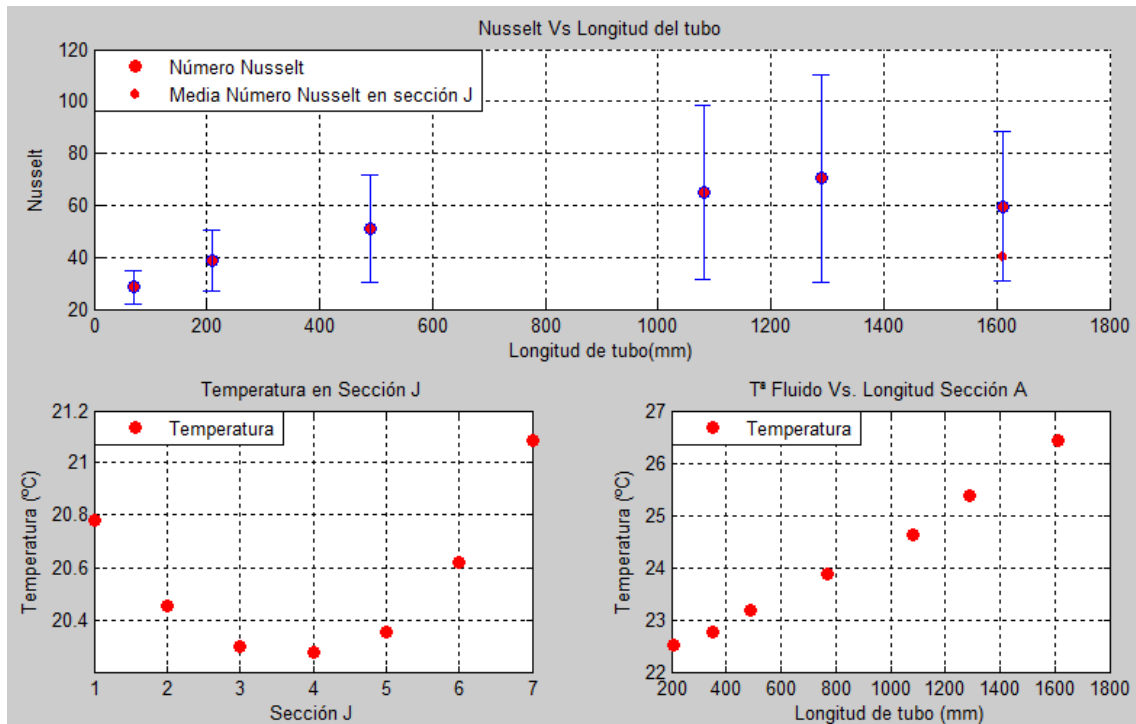


Figura 110: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:41 kg/h P:800 w/m²:

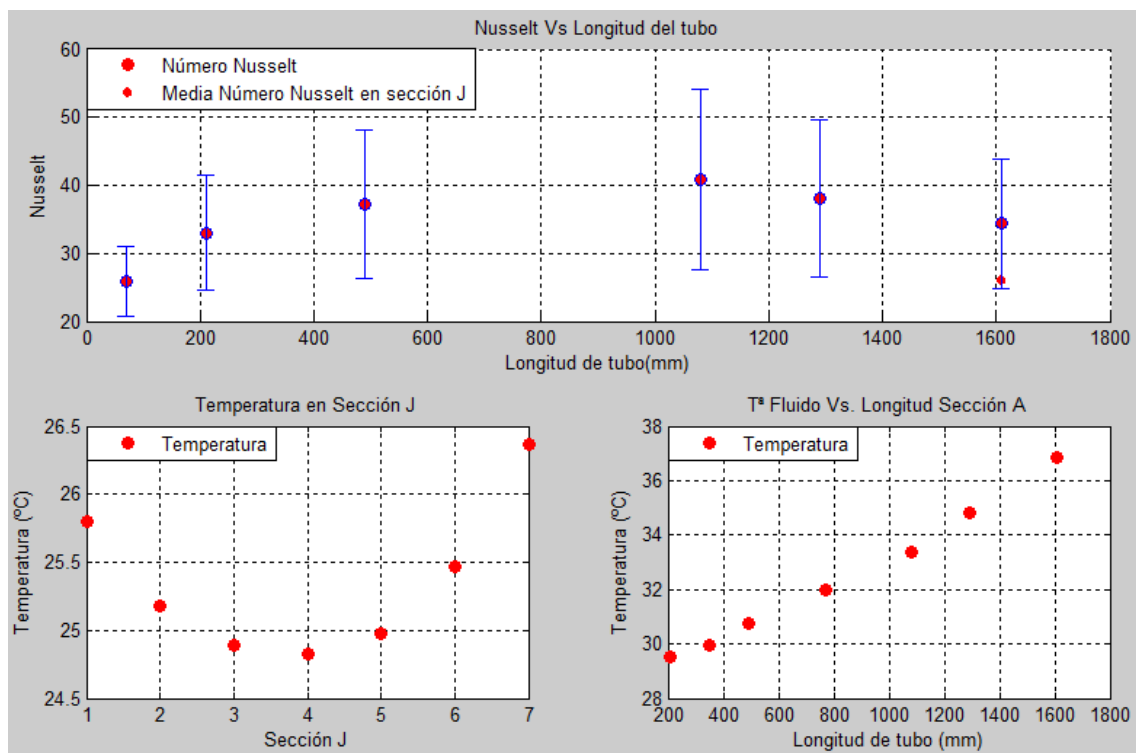


Figura 111: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:63 kg/h P:400 w/m²:

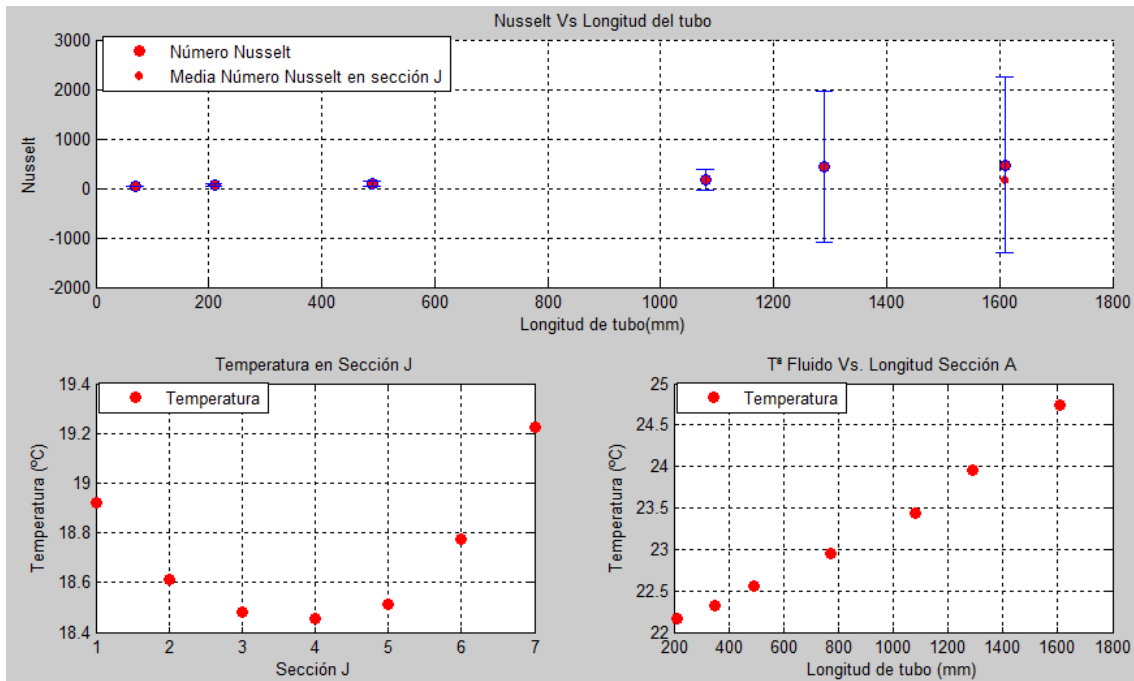


Figura 112: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:63 kg/h P:800 w/m²:

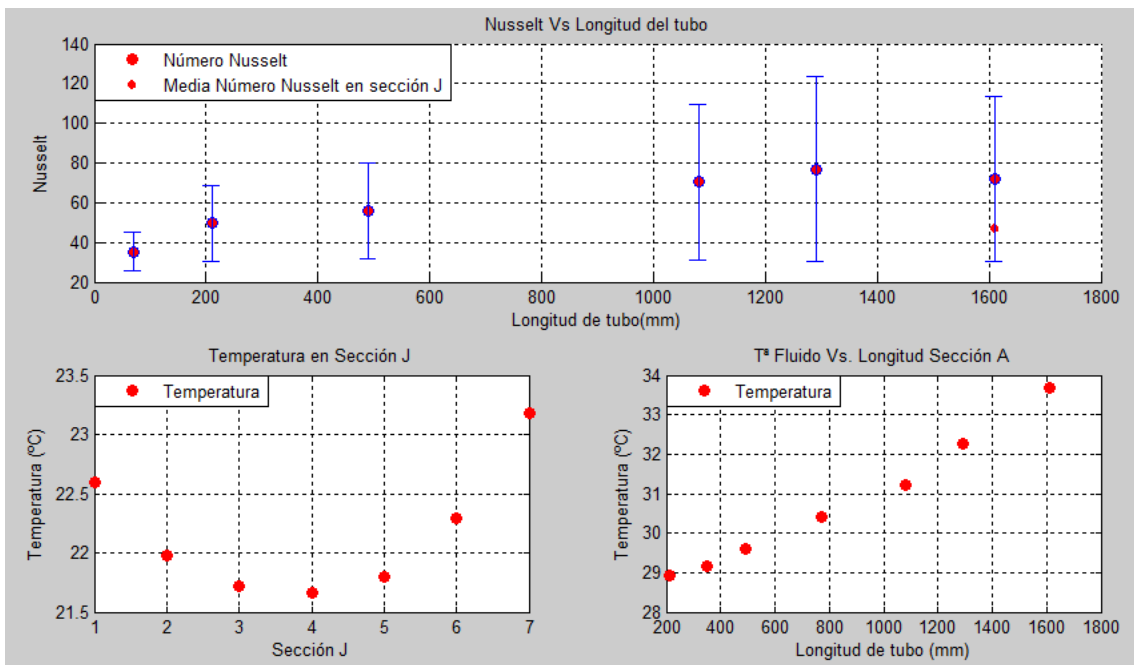


Figura 113: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:96 kg/h P:400 w/m²:

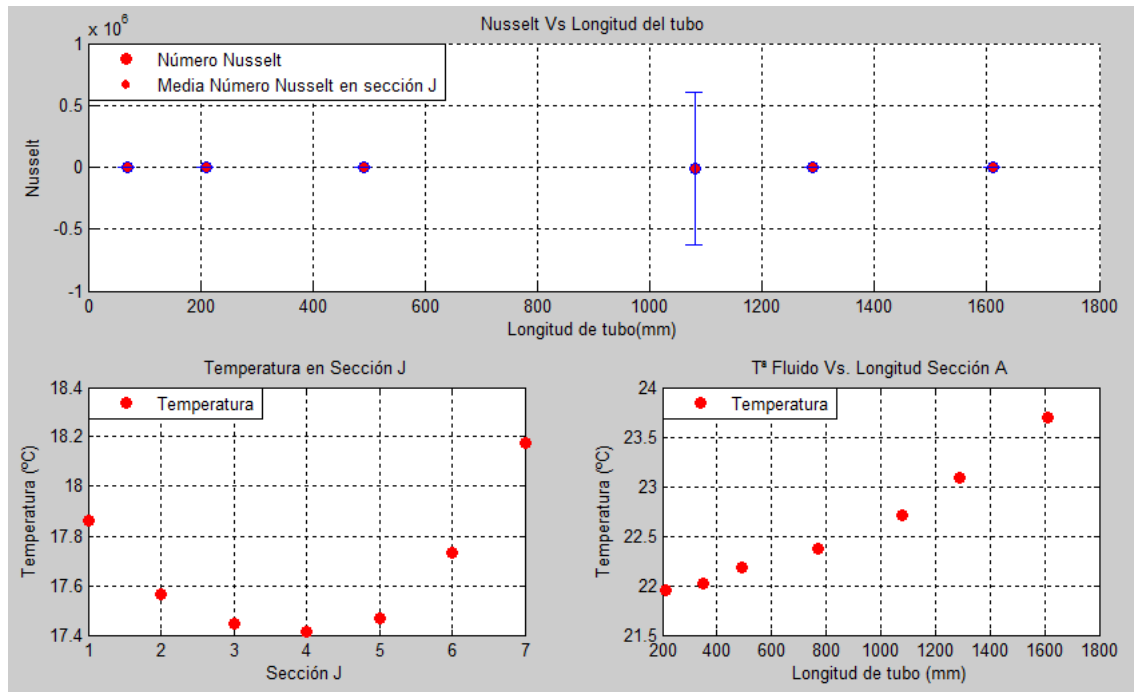


Figura 114: T° de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:96 kg/h P:800 w/m²:

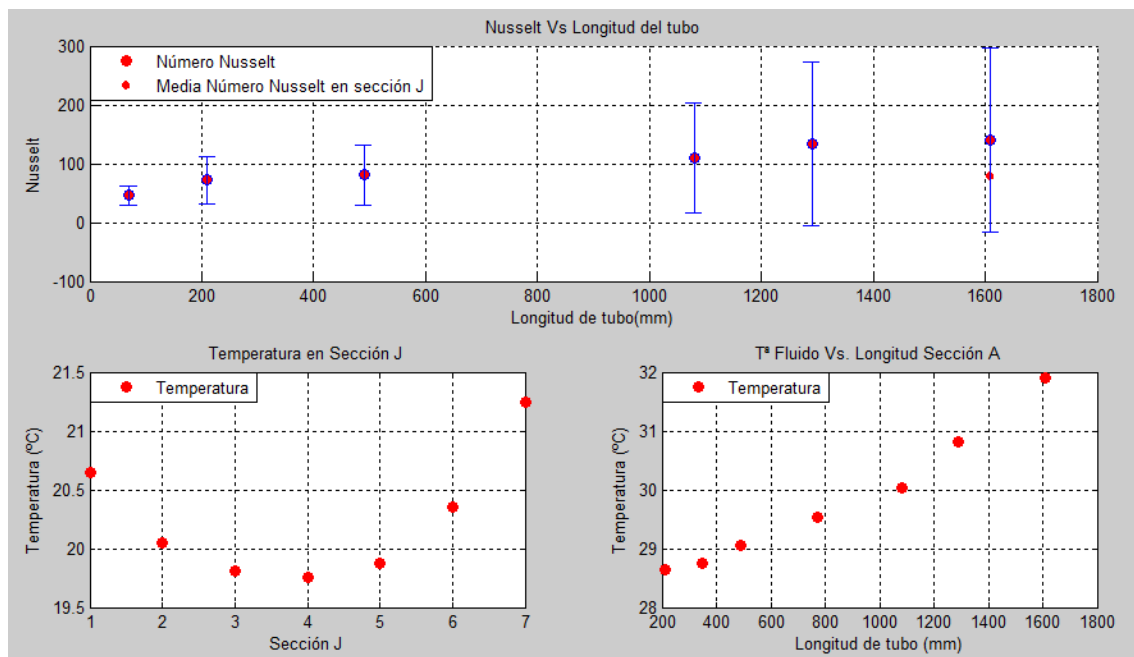


Figura 115: T° de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:150 kg/h P:400 w/m²:

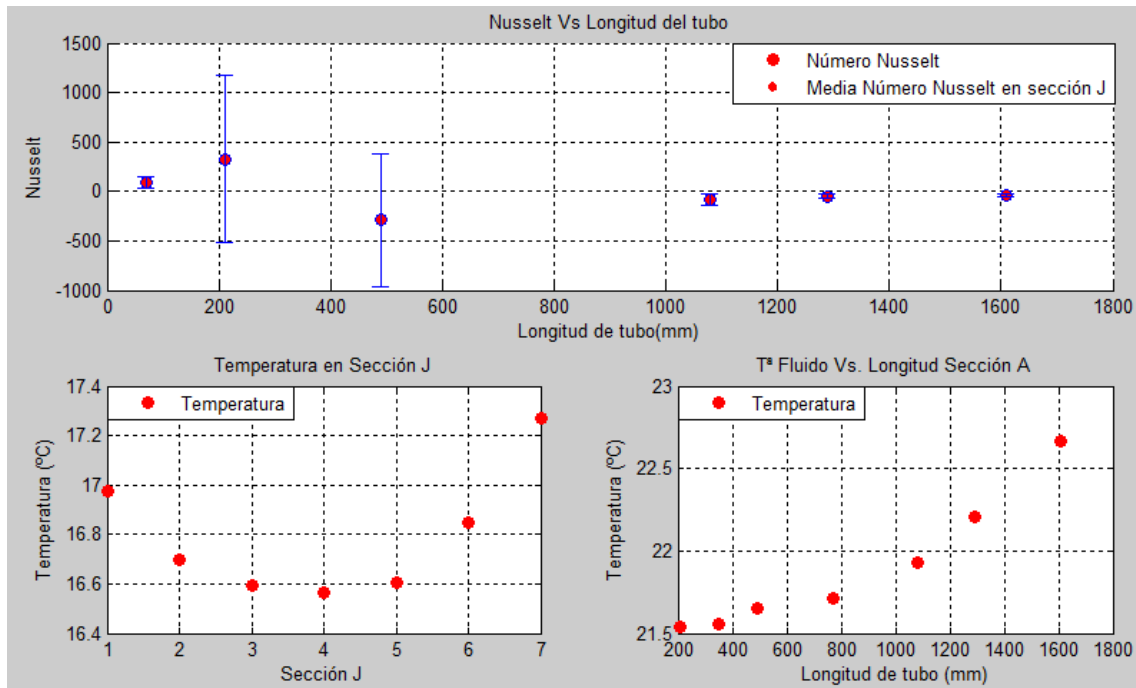


Figura 116: T° de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:150 kg/h P:800 w/m²:

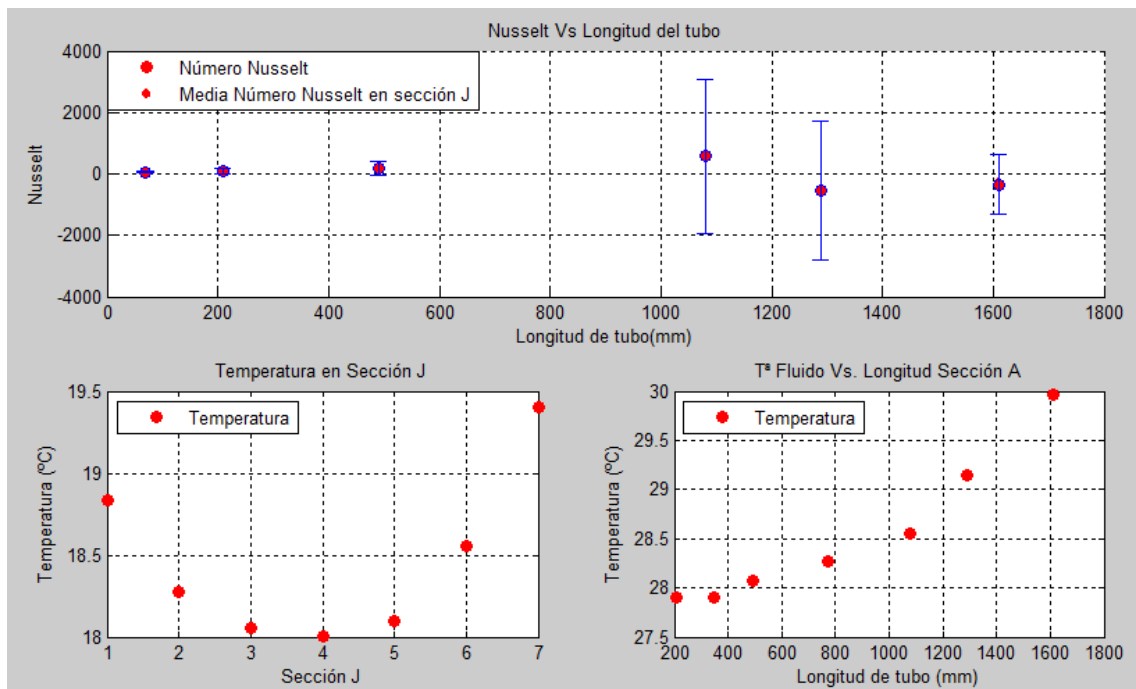


Figura 117: T° de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



ANÁLISIS DE RESULTADOS:

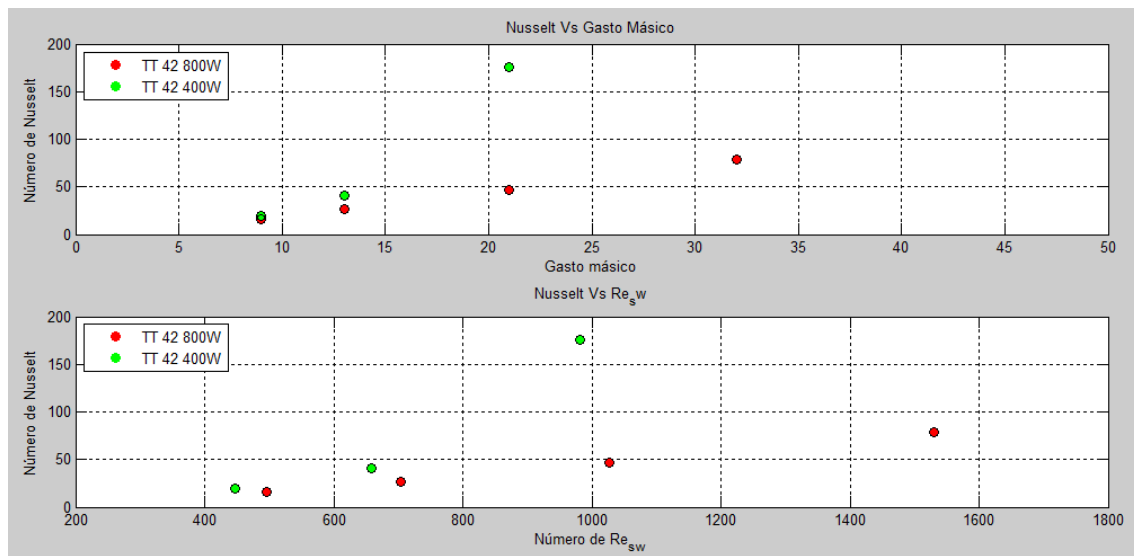


Figura 118: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. Re_{sw} .

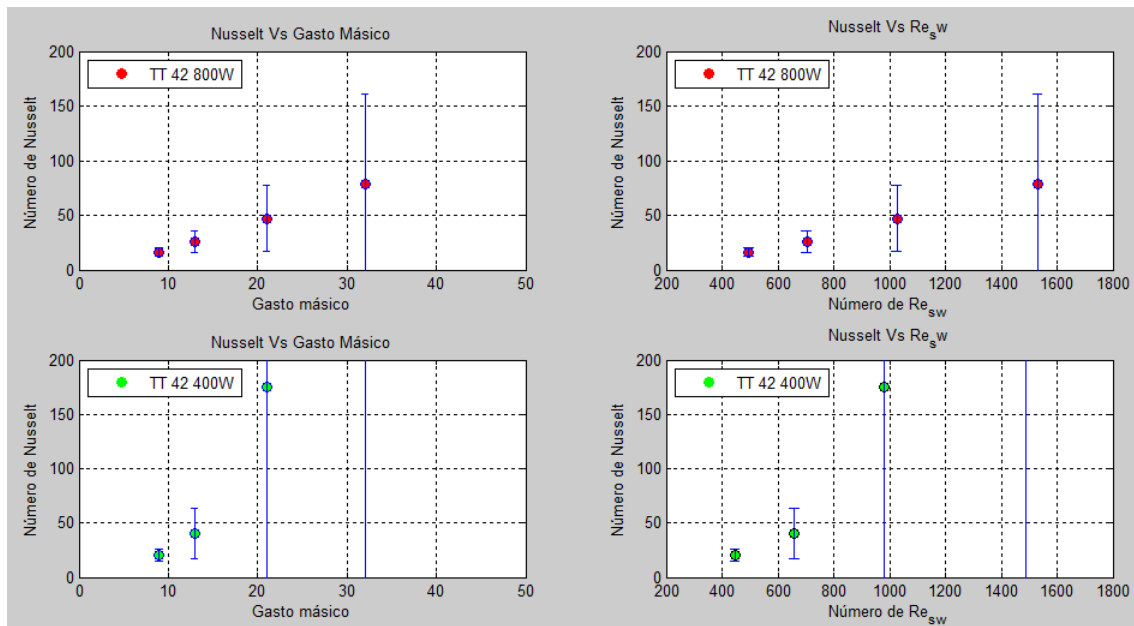


Figura 119: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. Re_{sw} .



➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².

Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	19,410	25,785	26,728	29,883	29,612	25,626
41 kg/h		28,467	38,646	51,114	64,739	70,283	59,649
63 kg/h		38,808	61,665	82,740	163,297	436,723	472,605
96 kg/h		53,580	106,058	161,850	-8840,398	-220,511	-166,218
150 kg/h		87,560	328,782	-291,548	-81,454	-50,399	-43,796

Tabla 11: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².

➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m²

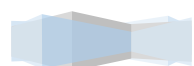
Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	17,464	22,921	22,913	24,574	21,640	19,392
41 kg/h		25,861	32,988	37,269	40,753	38,046	34,378
63 kg/h		35,374	49,586	55,662	70,526	76,672	72,039
96 kg/h		46,210	72,296	81,120	109,175	132,891	140,911
150 kg/h		60,321	108,644	168,917	565,244	-536,269	-350,759

Tabla 12: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

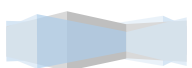
➤ Nusselt e incertidumbre de Nusselt.

Potencia	TT 42 800W/m2			TT 42 400W/m2		
Gasto Másico	Nu_HW	uNu_HW	Resw_HW	Nu_LW	uNu_LW	Resw_LW
27 kg/h	16,015	3,769	496,244	19,983	5,630	447,869
41 kg/h	26,108	9,844	703,436	40,694	23,477	659,124
63 kg/h	47,079	30,043	1026,606	175,455	601,399	980,919
96 kg/h	78,695	82,888	1530,693	225,374	-102914,030	1486,041
150 kg/h	-285,506	-63,150	2340,040	-56,728	25,372	2301,377

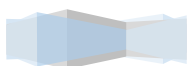
Tabla 13: Nusselt e incertidumbre de Nusselt.



3.4.3 ENSAYOS TT 84. (VER ANEXO III)



3.4.4 ENSAYOS TT 126. (VER ANEXO III)



3.4.5 ENSAYOS TT. COMPARATIVA GLOBAL.

En la figura que se muestra se pueden observar los resultados de número de Nusselt frente a Reynolds para las tres láminas estudiadas a 400 W/m² y 800 W/m². Se observa mayor número de Nusselt para la potencia de 400 W/m², hecho éste atribuible a la incertidumbre de medida. Las dos láminas TT 126 y TT 84 tienen valores del número de Nusselt similares. El aumento del número de Nusselt para Reynolds 1000 y 800 W/m² es de 2,8 para TT126 y 3,5 para TT 84. El número de Nusselt para la lámina TT 42 es mucho mayor, con un aumento de Nusselt de 7,1 para Reynolds 1000 y 800 W/m².

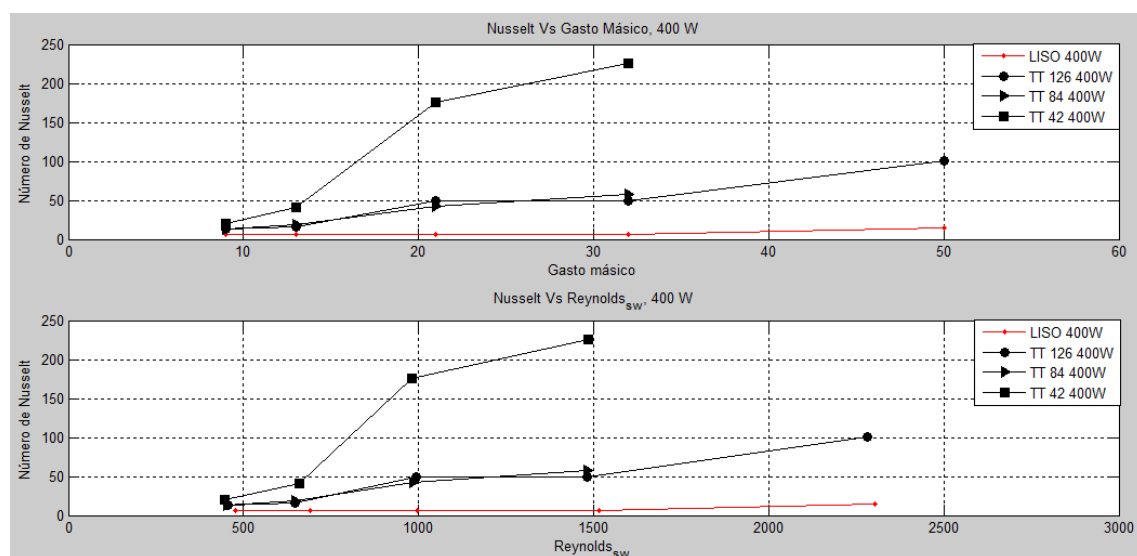


Figura 120: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. Re_{sw}.

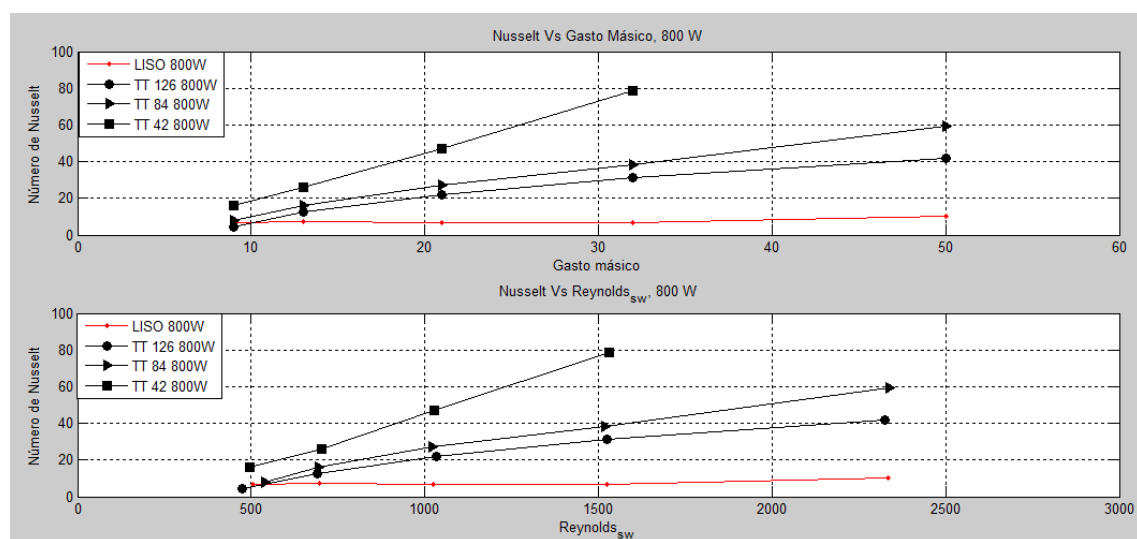
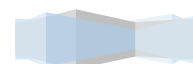


Figura 121: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. Re_{sw}.



3.4.6 ENSAYOS MUELLE WC 01.

Características:

TIPO	d (mm)	p (mm)	e (mm)	p/d	e/d
WC01	7	10,5	0,7	1,5	0,1

Tabla 14: Característica para WC 01.

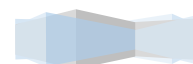
Se han ensayado con dos potencias diferentes: 400 W/m^2 y 800 W/m^2 . Para cada potencia se ha estudiado la evolución de la temperatura para los caudales siguientes:

Potencia W/m^2	Potencia W	Gasto másico	Potencia W/m^2	Potencia W	Gasto másico
800 w/m2	468 w	150 kg/h	400 w/m2	234 w	150 kg/h
800 w/m2	468 w	96 kg/h	400 w/m2	234 w	96 kg/h
800 w/m2	468 w	63 kg/h	400 w/m2	234 w	63 kg/h
800 w/m2	468 w	41 kg/h	400 w/m2	234 w	41 kg/h
800 w/m2	468 w	27 kg/h	400 w/m2	234 w	27 kg/h

Tabla 15: Ensayos para WC 01.

Desarrollo de ensayos:

- Cálculo de número de Nusselt frente a la longitud del tubo.
- Cálculo de la temperatura del absorbedor a lo largo del tubo.
- Cálculo de la temperatura en la sección J.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.



G:27 kg/h P:400 w/m²:

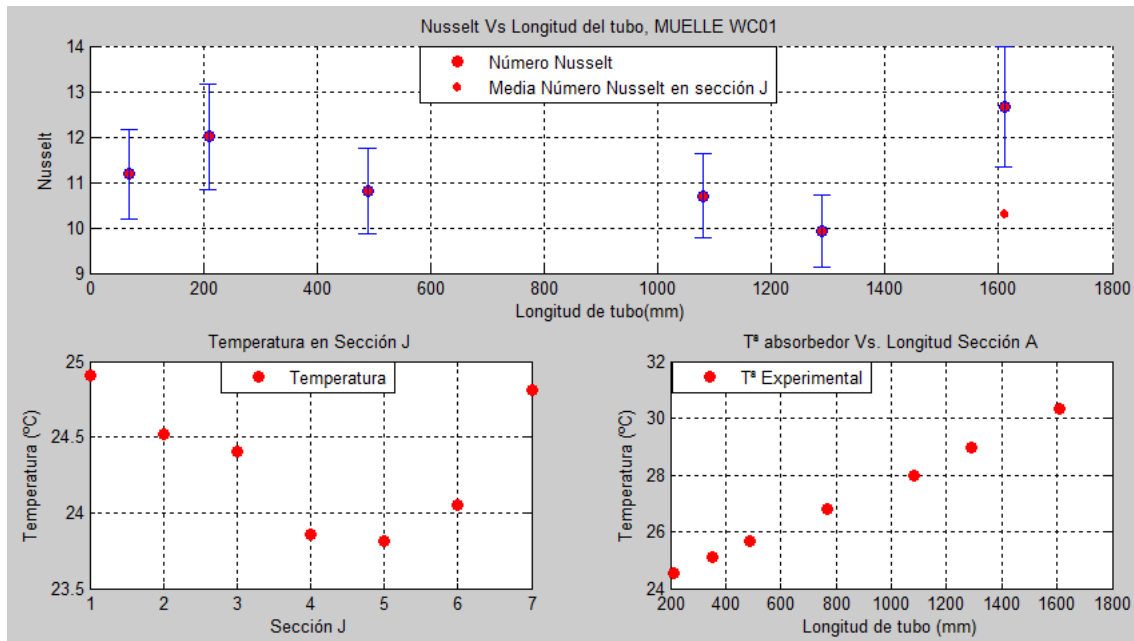


Figura 122: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:27 kg/h P:800 w/m²:

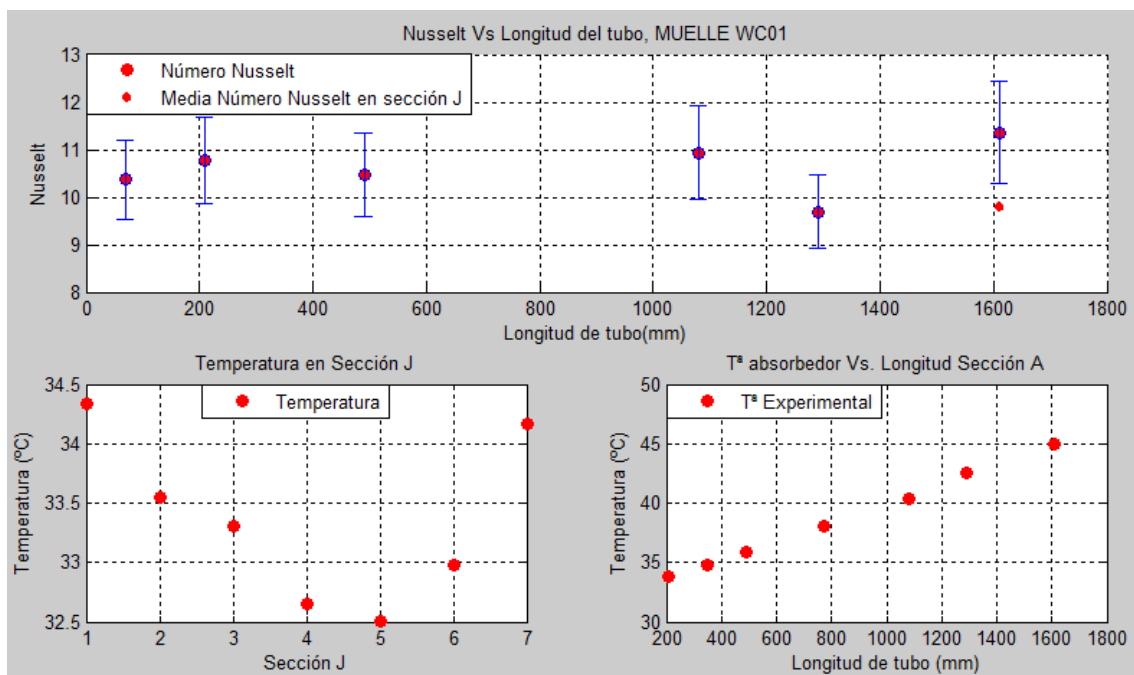


Figura 123: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:41 kg/h P:400 w/m²:

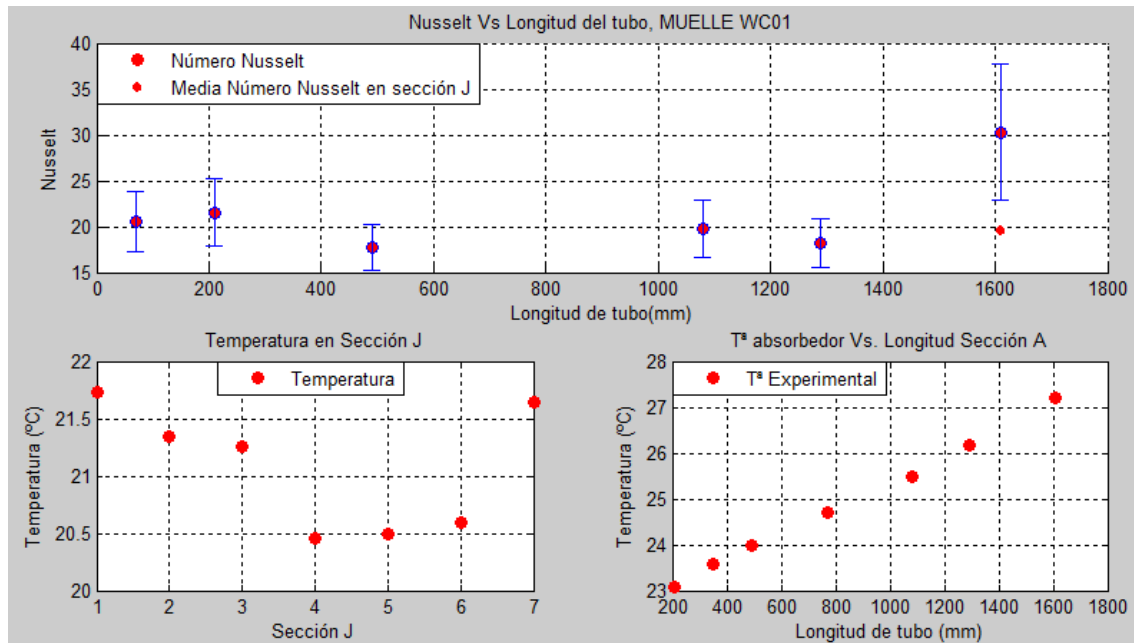


Figura 124: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:41 kg/h P:800 w/m²:

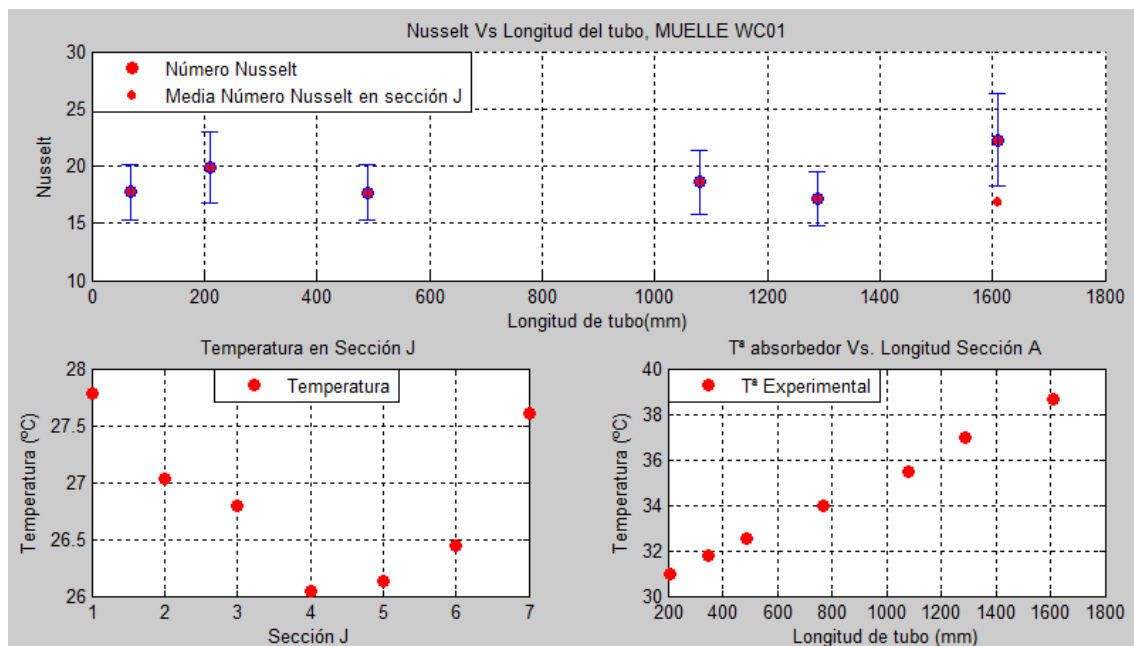
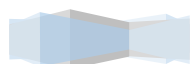


Figura 125: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:63 kg/h P:400 w/m²:

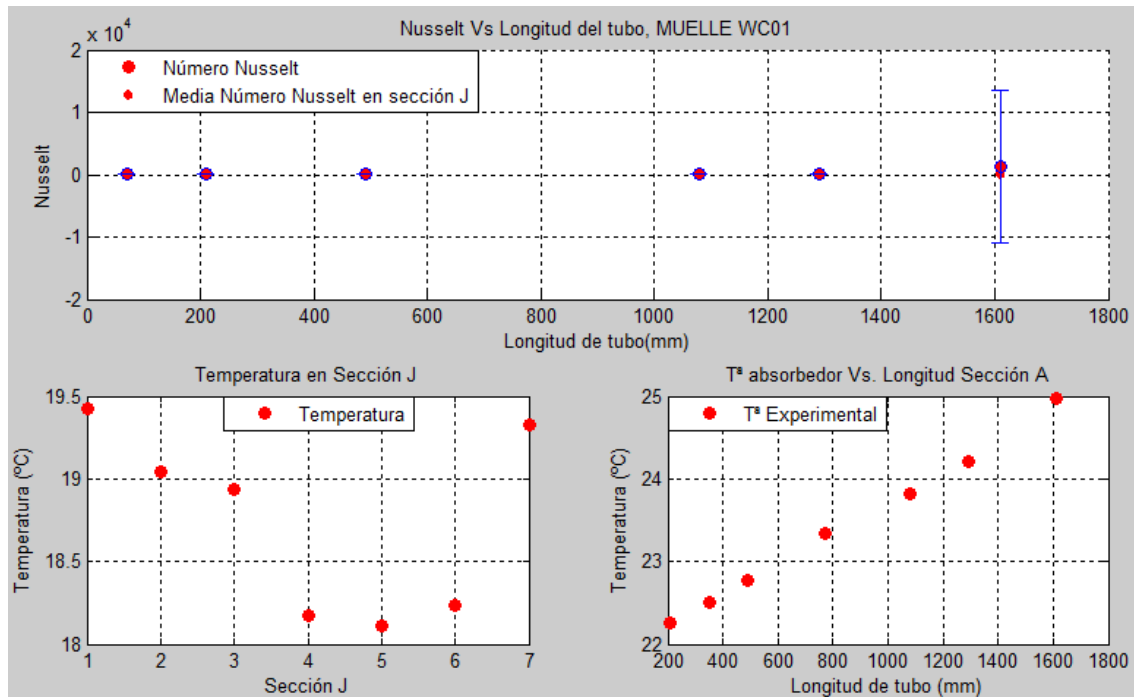


Figura 126: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:63 kg/h P:800 w/m²:

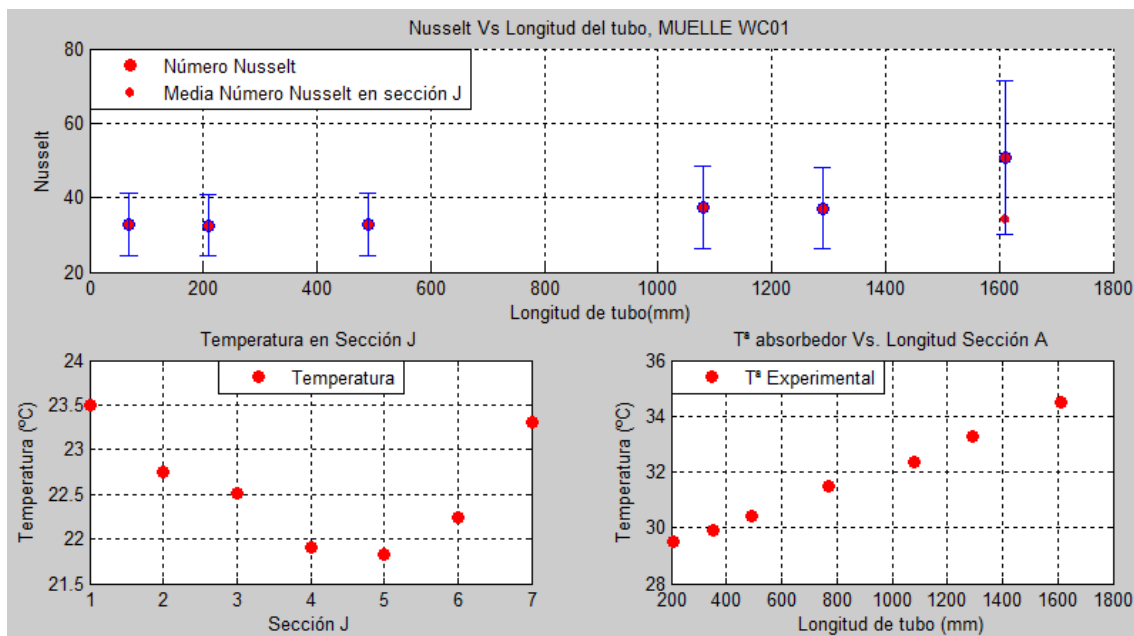


Figura 127: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:96 kg/h P:400 w/m²:

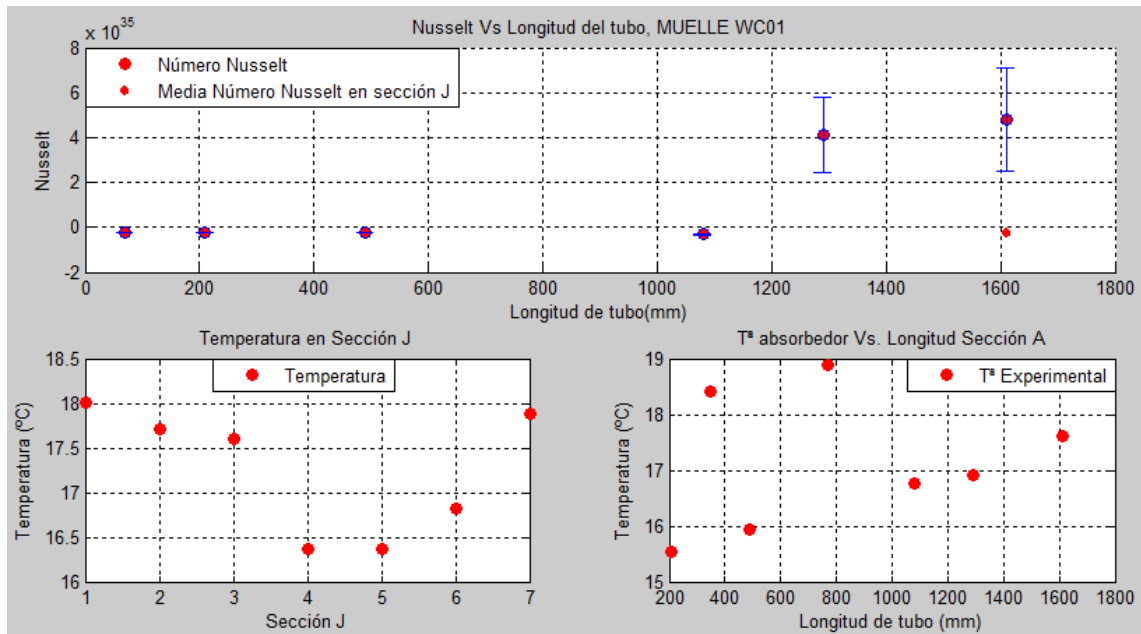


Figura 128: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:96 kg/h P:800 w/m²:

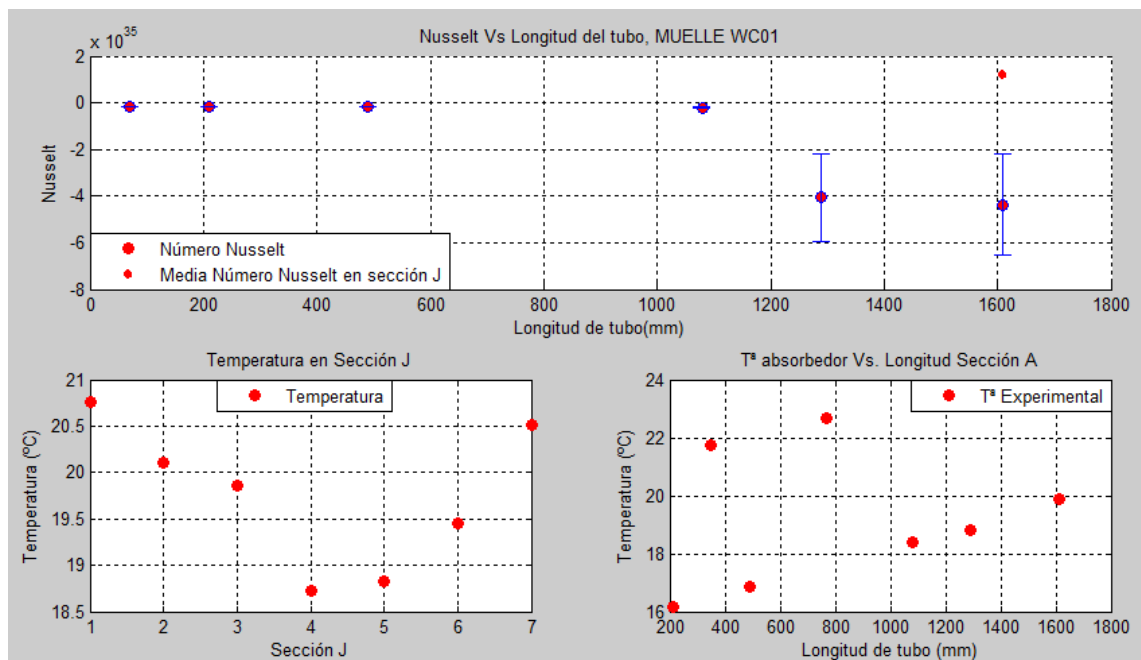


Figura 129: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



ANÁLISIS DE RESULTADOS:

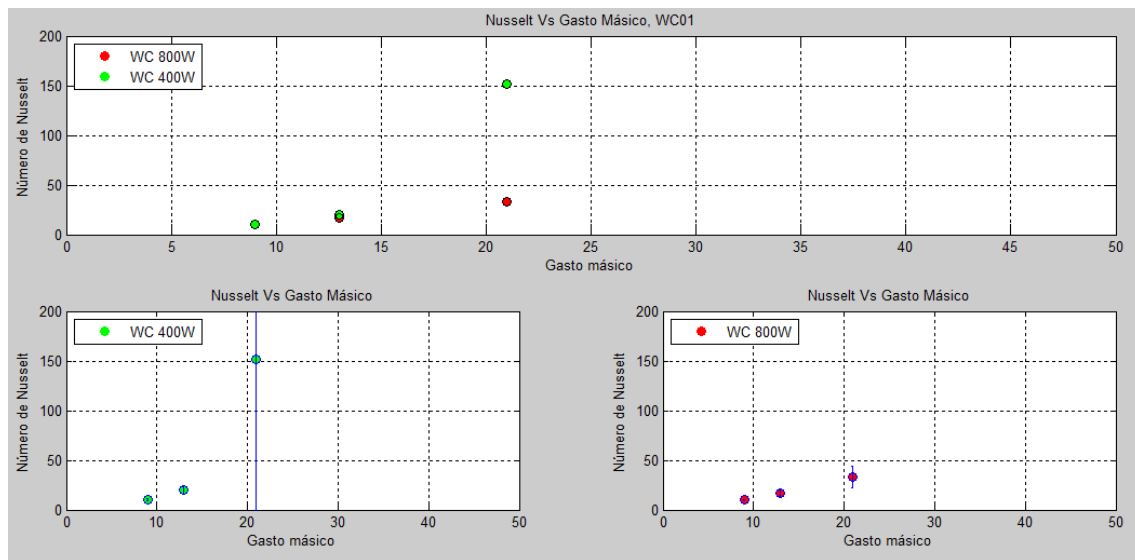
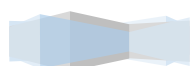


Figura 130: Nusselt Vs.Gasto Másico.

➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².

Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	27,983	37,540	41,222	47,100	49,106	49,454
41 kg/h		62,290	88,835	90,022	128,273	174,532	214,729
63 kg/h		140,426	295,700	204,797	865,989	-586,374	-518,096
96 kg/h		750,979	-1334,607	-842,485	-181,578	-105,808	-96,691
150 kg/h		27,983	37,540	41,222	47,100	49,106	49,454

Tabla 16: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².



➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

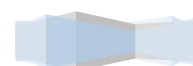
Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	23,610	30,946	31,891	31,700	30,134	30,677
41 kg/h		49,690	61,511	61,546	60,318	57,522	55,538
63 kg/h		86,636	110,231	99,025	97,821	98,253	87,363
96 kg/h		186,881	250,013	241,174	254,752	341,066	292,935
150 kg/h							

Tabla 17: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

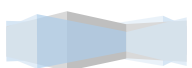
➤ Nusselt e incertidumbre de Nusselt.

Potencia	WC01 800W/m2		WC01 400W/m2	
Gasto Másico	Nu_HW	uNu_HW	Nu_LW	uNu_LW
27 kg/h	9,912	0,930	10,274	1,003
41 kg/h	16,858	2,863	19,626	3,782
63 kg/h	35,116	12,049	152,130	2052,164
96 kg/h				
150 kg/h				

Tabla 18: Nusselt e incertidumbre de Nusselt.



3.4.7 ENSAYOS MUELLE WC 02. (VER ANEXO IV)



3.4.8 ENSAYOS MUELLE WC 03. (VER ANEXO IV)



3.4.9 ENSAYOS MUELLES. COMPARATIVA GLOBAL.

En la figura que se muestra más abajo se pueden observar los resultados obtenidos del número de Nusselt frente a Reynolds, para los tres muelles insertados estudiados para 400 W/m² y 800 W/m². Se observa mayor número de Nusselt para la potencia de 400 W/m², hecho éste atribuible a la incertidumbre de Nusselt de medida. Los dos muelles en los que se vio un cambio de régimen en la curva de factor de fricción tienen número de Nusselt notablemente mayores que el muelle WC 03, pese a que éste tiene un factor de fricción mucho mayor. Puede decirse que globalmente el muelle con mejor comportamiento termohidráulico es el WC 01, puesto que se obtiene un aumento del número de factor de fricción de 4,3; para el WC 02 será de 8,6, mientras que el aumento de factor de fricción es de 5 para el WC01 y de 30 para el WC 02.

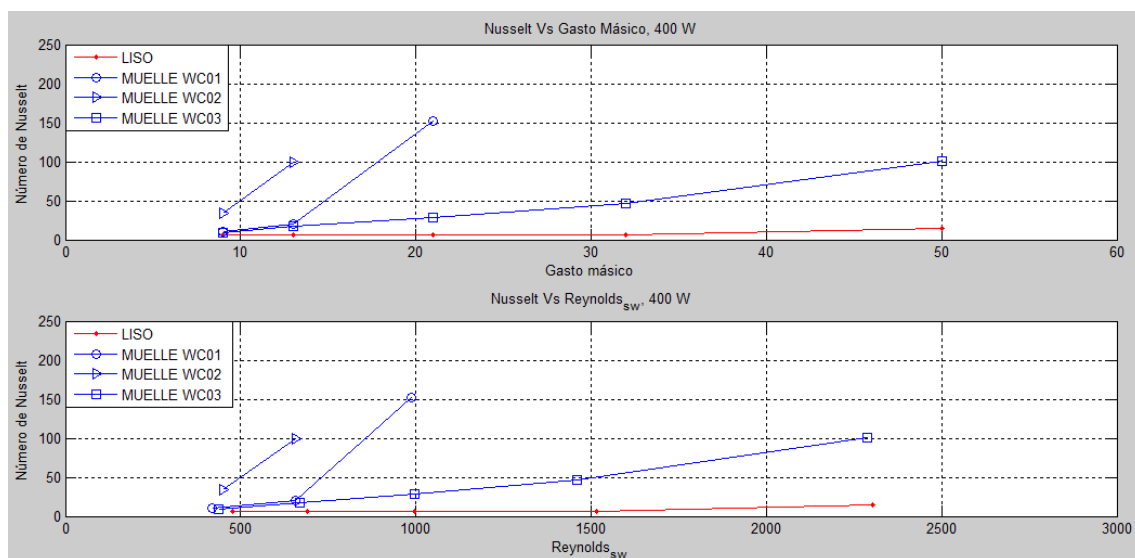


Figura 131: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. Re_{sw}.

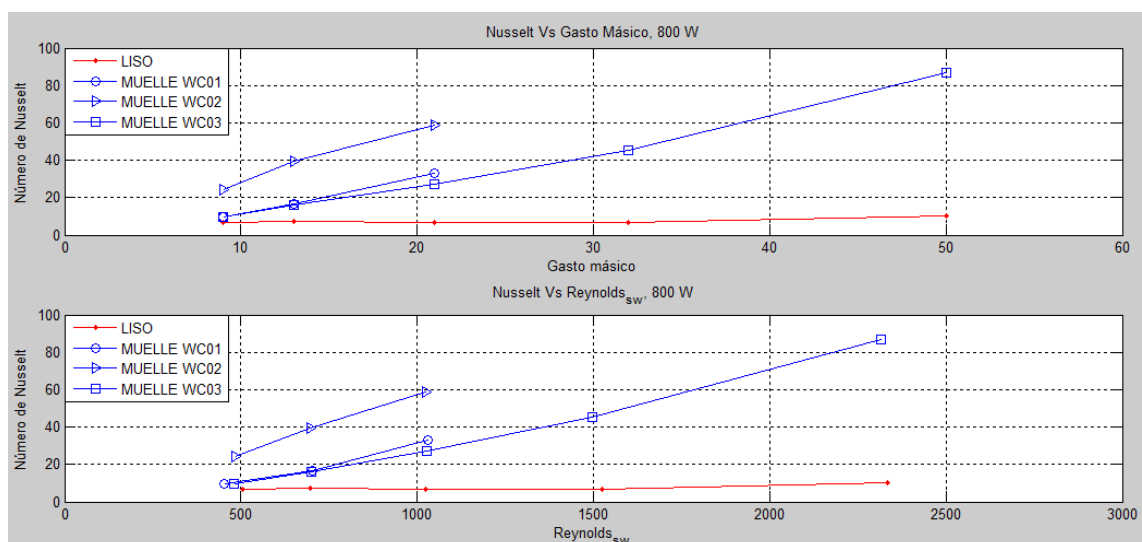


Figura 132: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. Re_{sw}.



3.5 COMPARATIVA: NÚMERO DE NUSSELT. TODOS LOS DISPOSITIVOS.

Las figuras que mostramos a continuación presentan el Número de Nusselt frente a Reynolds para todas las geometrías ensayadas, haciendo distinción para los calores de 400 W/m^2 y 800 W/m^2 .

De entre todos los elementos, el mayor número de Nusselt en la sección J se observa para el muelle WC02 y la lámina TT 42 (aumento del número de Nusselt de 8,6 y 7,1, respectivamente, a Reynolds 1000 a 800 W/m^2). No obstante el muelle WC01 tiene valores cercanos a lámina TT 42 (aumento del número de Nusselt de 4,3 a Reynolds 1000 a 800 W/m^2). El resto de elementos se comportan de manera similar por lo que la selección de uno u otro se haría en base al factor de fricción estudiado en los apartados anteriores. Hay que subrayar que a ciertos valores de Reynolds o gasto másico no se presentan resultados de Nusselt para algunas geometrías, puesto que el valor de incertidumbre invalida los resultados obtenidos. En general, las incertidumbres son apreciables en todos los gastos másicos estudiados y todos los elementos insertados debido a las limitaciones ofrecidas por los elementos de medida. Tubo Liso presenta valores de incertidumbre de Nusselt más moderadas. Esto provoca que mientras los resultados de número de Nusselt para tubo Liso a 400 W/m^2 y 800 W/m^2 sean similares. Por el contrario, los niveles de número de Nusselt de los elementos insertados a 400 W/m^2 son mayores que a 800 W/m^2 , debido a la mayor incertidumbre medida de los de 400 W/m^2 .

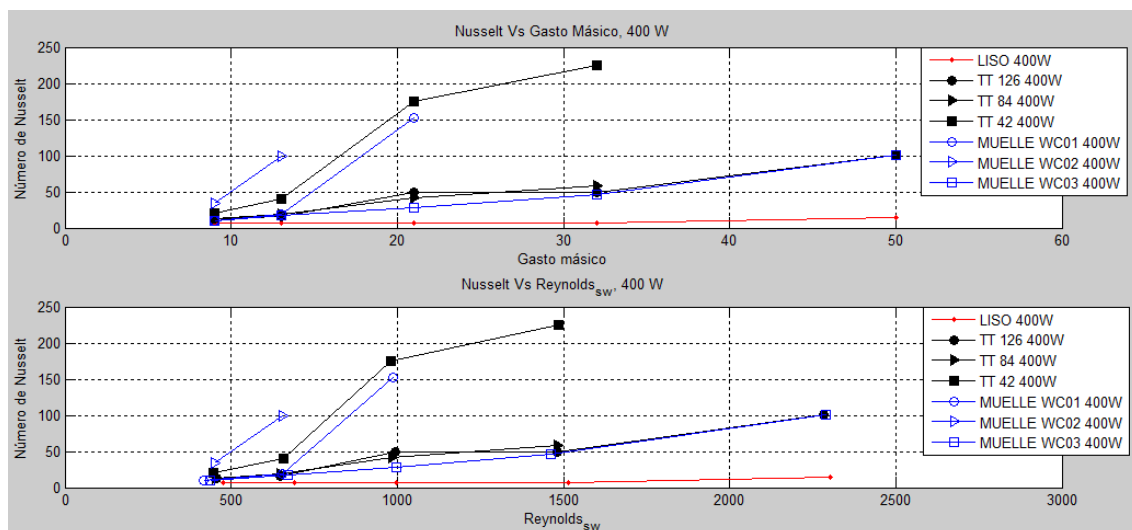


Figura 133: Nusselt Vs. Gasto Másico. Nusselt Vs. Re_{sw} . 400 W/m^2 .



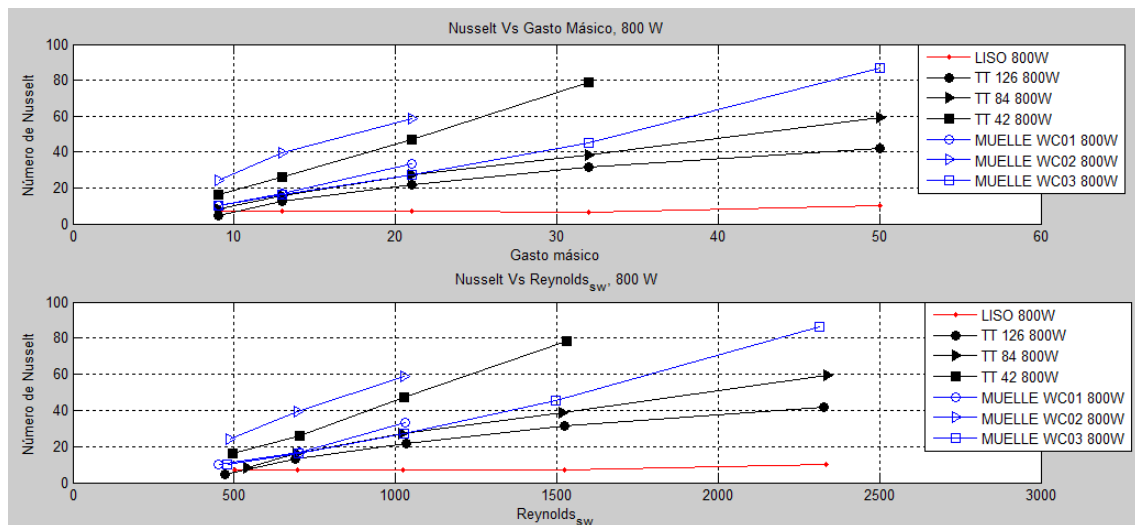
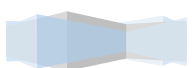


Figura 134: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. Re_{sw}. 800 W/m².

Como conclusión general, podemos decir que el muelle WC02 es el dispositivo que más aumenta la transmisión de calor. No obstante, el aumento del factor de fricción para WC02 es de 35, siendo casi el doble al de la lámina TT 42 que será de 14. El muelle WC01, aunque tiene valores de Nusselt inferiores al muelle WC02, y ligeramente inferiores a la lámina TT 42, tiene valores de aumento de factor de fricción mucho menores, por lo que puede decirse que este elemento insertado es el que presenta un mejor comportamiento termohidráulico. Su uso sería el recomendado para implementarse en captadores solares, especialmente si fueran para configuración en serpentín, donde el incremento de pérdida de presión para la elección de un elemento insertado es clave para su selección. Dado que en captadores solares en parrilla la pérdida de presión en el captador es una pequeña fracción de la pérdida global de la instalación a utilizar, puede decirse que la mejor elección sería el muelle WC02 ya que maximizaría el calor útil extraído por el captador.



PFC: Estudio del comportamiento termohidráulico en tubos de colectores solares planos con láminas en espiral



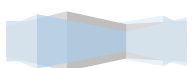
4. CONCLUSIONES.

4.1. CONCLUSIONES DEL PROYECTO.

4.2. LINEAS DE ESTUDIO A FUTURO.

4.3. POSIBLES MEJORAS DE LA INSTALACIÓN.

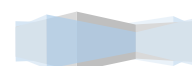




4 CONCLUSIONES.

4.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO.

- Se ha realizado una revisión bibliográfica de la transferencia de calor en conductos, como la convección forzada y mixta.
- Se ha realizado una revisión bibliográfica de la transferencia de calor mejorada con muelles rígidos y láminas alabeadas insertadas, encontrando definiciones de parámetros adimensionales y del factor de fricción que definen el comportamiento termohidráulico de los muelles rígidos.
- Se ha realizado una revisión bibliográfica sobre la transferencia de calor en colectores solares planos.
- Se han descrito uno a uno los elementos que forman el banco de ensayos y se ha especificado su utilidad y características a tener en cuenta a la hora de tratarlos.
- Se ha desarrollado un protocolo de ensayos de transferencia de calor y de procesamiento de los datos que permite la lectura en tiempo real de las magnitudes y la visualización de algunas figuras importantes.
- En la instalación experimental se han realizado distintos tipos de ensayos para el estudio de la transferencia de calor en los colectores solares planos. Estos ensayos se han realizado a cinco caudales diferentes, con el agua como fluido de transferencia de estudio, con calor aplicado por la manta uniformemente con valor de 400W/m^2 y de 800W/m^2 y a distintitos tipos de pasos de láminas introducidos en los tubos, así como con muelles rígidos insertados, que han permitido la obtención de valores del número de Nusselt, valores del número de Reynolds que van desde $Re=100$ hasta $Re=3500$. En total han sido 50 los ensayos procesados para este fin. Además se ha realizado un estudio de la transferencia de calor a lo largo del tubo y otro estudio de la transferencia de calor en la sección plenamente desarrollada.
- Se ha realizado un cálculo de incertidumbre de Nusselt donde se ha evaluado la contribución del error de los aparatos de medida y de la dispersión de los datos en la incertidumbre global del número de Nusselt. Se observa que la contribución dominante es el error debido a los aparatos de medida y la incertidumbre aumenta bruscamente con el caudal.
- Se ha realizado un estudio del factor de fricción isoterma tanto para tubo liso, muelles rígidos y para láminas alabeadas. Se ha comparado los resultados obtenidos con correlaciones teóricas de Manglik. Se observa que para el tubo liso tiene un menor número de fricción de Fanning. En cuanto a la pérdida de carga, cuanto mayor es el paso de la lámina es la pérdida de carga disminuye, siendo el tubo liso el que menor pérdida de carga presenta.

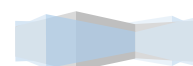


Del estudio de la transferencia de calor a lo largo del tubo se han sintetizado las siguientes conclusiones:

- En los ensayos realizados con agua como fluido circulante, para las láminas y muelle rígido, para todos los casos de pérdida de carga son superiores a la del tubo liso.
- En los ensayos realizados con agua para todos los casos, tanto muelle rígido como con láminas alabeadas, la transmisión es superior al tubo liso desde el inicio. Cuanto menor sea el paso de las láminas alabeadas mejor será la transferencia de calor obteniendo un mayor número de Nusselt.
- El comportamiento de la distribución de temperatura en el absorbedor es similar empleando agua. De manera general se observa que:
 - En caudales pequeños la temperatura del absorbedor es máxima cuando no existen elementos insertados en los tubos y se produce un fenómeno de enfriamiento del absorbedor al insertar los muelles en los tubos que aumenta al aumentar la densidad del muelle.
 - En caudales superiores en los que el flujo es plenamente turbulento aumentado la incertidumbre de Nusselt, lo que hace difícil el cálculo del número de Nusselt a esos caudales.

Del estudio de la transferencia de calor en la sección plenamente desarrollada se han sintetizado las siguientes conclusiones:

- La transmisión de calor alrededor del tubo es mejor cuanto mayor sea el caudal circulante y la potencia de la manta sea menor, ya que la temperatura de pared varía directamente con dichas magnitudes. Al aumentar el caudal la influencia de la potencia de la manta sobre la temperatura media de pared va disminuyendo progresivamente y la transmisión de calor al fluido toma más peso.
- El efecto de la estratificación del flujo está presente en todos los ensayos y se ve más acentuado en todo momento en los ensayos con el muelle WC 02 insertado, y aumenta con la potencia. Se establece que la densidad del muelle es un factor influyente en este fenómeno de manera que a más densidad menor estratificación del flujo, como es lógico, pues el efecto swirl de los muelles es directamente proporcional a su densidad
- La diferencia de temperatura periférica máxima es mayor en el tubo liso que en el muelle y las láminas.



4.2 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.

- Mejoras en la instalación.
- Estudio de colectores solares térmicos con láminas alabeadas (twisted tapes) con otros fluidos (Propilenglicol, combinación de líquidos orgánicos sintéticos, aceites de silicona, etc...)
- Comparación del funcionamiento con otras geometrías posibles.
- Estudio a diferentes caudales a los ensayados hasta la fecha.
- Evaluación energética de captadores mejorados: búsqueda del captador óptimo desde el punto de vista del consumo energético de la instalación.
- Obtención de la curva de rendimiento de un colector.

4.3 POSIBLES MEJORAS DE LA INSTALACIÓN.

- Fuente de alimentación propia, para evitar las posibles fluctuaciones de tensión, teniendo un aporte de calor a las mantas de forma más controlada y estable.
- Método más fácil de acceso para introducir o retirar las láminas. Sujeción de láminas a la fontanería para evitar desplazamientos no deseados de la colocación de las láminas.
- Colocación de captadores para espacios reducidos en ensayos de interior. Separación mayor entre captadores.
- Rango de caudales diferentes de estudio debido a los problemas, tanto en caudales bajos para conseguir tiempo de establecimiento, como con caudales altos obteniendo errores con el cálculo del número de Nusselt.
- Mejoras a nivel instrumental.



ANEXOS





ANEXO I: HOJAS DE DATOS DE LOS ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN

I. INSTALACIÓN HIDRÁULICA

I.I. INTERCAMBIADOR DE CALOR

MODELO 2C2

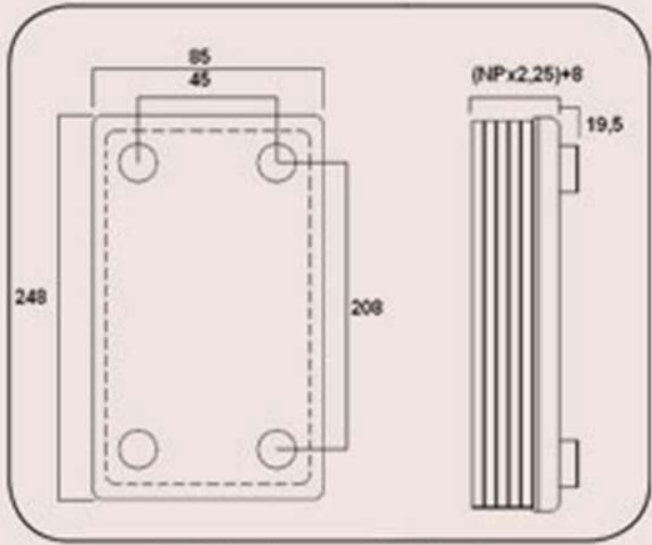
Características Técnicas

Máximo número de placas	40
Peso en vacío Kgs.	1+(NPx0,084)
PS max/min (bar g)	30/-1
PT (bar g)	43
Conexión Standard	Polivalente roscar-soldar
Conexiones especiales	machones


Datos Generales

Material conexiones	AISI 316
Material soldaduras	Cobre 99,9%
Material placas	AISI 316L
Temp. máxima	+150°C
Temp. mínima	-40°C

Medidas



Conexiones: Polivalentes roscar/soldar 1/2"



I.II. DEPÓSITO

edesa

Serie Redondo Confort

50 l. / 30 l.

Gama TRE

TRE-50 SUPRA (50 LITROS)

od. 911270004

EAN-13: 8413880194240

TRE-30C SUPRA (30 LITROS)

od. 911270002

EAN-13: 8413880194226

TRE-30 SUPRA (30 LITROS)

od. 911270003

EAN-13: 8413880194233

Forma exterior redonda
Instalación vertical (TRE-30 SUPRA)
Reversible: Instalación horizontal y vertical
Resistencias envainadas
Cuba de acero con esmalte al titanio vitrificado a 850°C
Termostato regulable con mando inferior
Protección antihielo
Posición ECO
Piloto de calentamiento (parte interior)
nodo de magnesio
Superaislamiento de poliuretano expando sin CFC y sin H
Sensor termostático envainado
Termostato de seguridad
Manguitos aislantes
Válvula de seguridad con dispositivo de vaciado
Exterior con recubrimiento de pintura epoxi



I.III. MÁQUINA FRIGORÍFICA

Specifications List

Product specification

Table 8-1 Specifications List [HRS050-**-20- (BJM)]

Model			HRS050-A**-20- (BJM)	HRS050-W**-20- (BJM)
Cooling method			Air-Cooled refrigerated type	Water-Cooled refrigerated type
Refrigerant			R410A (HFC)	
Control method			PID control	
Ambient temperature and humidity ^{*2}			Temperature :5 to 40°C、Humidity:30 to 70%	
Circulating fluid system	Circulating fluid ^{*3}		Tap water, Ethylene glycol aqueous solution 15% ^{*4}	
	Operating temperature range ^{*2}	°C	5 to 40	
	Cooling capacity ^{*4} (50/60Hz)	W	4700/5100	
	Temperature stability ^{*6}	°C	±0.1	
	Pump capacity ^{*7} (50/60Hz)	MPa	0.24(at 23L/min)/0.32(at 28L/min)	
	Rated flow ^{*8} (50/60Hz)	L/min	23/28	
	Tank capacity	L	Approx. 5	
	Port size		Rc1/2	
Facility water outlet system ^{*15}	Wetted material		Stainless steel, Copper brazing (Heat exchanger) ^{*13} , Bronze ^{*13} Brass ^{*13} , SIC, Carbon, PP, PE, POM, FKM, EPDM, PVC, NBR	
	Temperature range	°C	-	5 to 40
	Pressure range	MPa	-	0.3 to 0.5
	Required flow ^{*13}	L/min	-	16
	Facility water pressure differential	MPa	-	0.3 more
	Port size		-	Rc1/2
Automatic fluid filling ^{*12}	Wetted material		-	Stainless steel, Copper brazing (Heat exchanger), Bronze, Synthetic rubber
	Feed water pressure range	MPa	0.2 to 0.5	
	Feed water temperature range	°C	5 to 40	
	Feed water capacity	L/min	Approx. 1	
	Automatic fluid filling Port size		Rc3/8	
	Over flow port Port size		Rc3/4	
Electric system	Power supply		AC200 to 230V, 50/60Hz. Allowable voltage range ±10 %	
	Breaker ^{*14}	A	20	
	Applicable earth leakage breaker capacity ^{*5}	A	20	
	Rated operating current ^{*3} (50/60Hz)	A	8.0/11.0	7.6/10.0
	Rated power consumption ^{*3} (50/60Hz)	kVA	1.68/2.20	1.55/2.00
Dimensions ^{*11}			W377xD592xH976 (W14.8xD23.3xH38.4[Inch])	
Accessory			Sequence I/O command signal connector 1pc., Operation manual (Installation·Operation) 1pc, Alarm code list label 1pc.	
Weight ^{*11}			69	67

- *1 Use the product in conditions where freezing will not occur.
Consult with SMC if using in a season or region where the ambient temperature will fall below zero.
- *2 If tap water is used, use water which satisfies the standard of The Japan Refrigeration And Air Conditioning Industry Association (JRA GL-02-1994/Cooling water system - circulation type - make-up water)
- *3 (1)Operating ambient temp.: 25°C, (2)Circulating fluid temp.: 20°C, (3)Circulating fluid rated flow, (4)Circulating fluid : Tap water, (5) Facility water temp.: 25°C(*15).
- *4 Use a 15% ethylene glycol aqueous solution if operating in a place where the circulating fluid temp. is lower than 10°C.
- *5 Outlet temp. when the circulating fluid flow is rated flow, and the circulating fluid outlet and the return are directly connected. Installation environment and power supply are within specification range and stable.
- *6 The capacity at the thermo-chiller outlet when the circulating fluid temp. is 20°C.
- *7 Fluid flow to maintain the cooling capacity and the temperature stability.
- *8 The specification of the cooling capacity and the temperature stability may not be satisfied if the flow rate is lower than the rated flow.
- *9 To be prepared by the customer. Use an earth leakage breaker with sensitivity of 30mA/200V in power supply specification.
- *10 Front 1m/Height 1m/Static with no load. See note 3 for other conditions.
- *11 Dimension between panels. Projection is not included.
- *12 Weight when the circulating fluid and facility water (for water-cooled type) is not included.
The weight will increase by 1kg when option J [Automatic fluid filling] is selected.
- *13 For option J [Automatic fluid filling port].
- *14 Copper, bronze and brass is not included when option M [DI water piping] is selected.
- *15 In case of option B [Earth leakage breaker], the breaker is changed to an earth leakage breaker.
- *16 For water-cooled type.



Communication specifications

▪ Contact input/output

Table 8-2 Specifications List

Item		Specification
Connector type (for this product)		MC1,5/12-GF-3,5
Input signal	Insulation system	Photo coupler
	Rated input Voltage	DC24V
	Operating voltage range	DC21.6V to 26.4V
	Rated input current	5mA TYP
	Input signal	4.7Ω
Contact output signal	Rated load current	AC48V or less /DC30V or less
	Maximum load current	AC/DC500mA (Resistance load)
Output voltage		DC24V±10% 0.5A MAX
Circuit structure diagram	<p>The diagram illustrates the internal circuitry of the 12-pin connector. It shows the connection between 'This product' and 'Your system'. Key components include a photo coupler for the input signal, a 4.7kΩ resistor, and a 1kΩ resistor. The output signals are labeled: DC24V output, 24VCOM output (0.5A MAX), Run/stop signal, Default unsetting, Run status signal, Remote signal, and Alarm signal.</p>	

▪ Serial communication

Table 8-3 Specifications List

Item	Specification	
Connector type (for this product)	D-sub9 pin Female connector	
Protocol	Modicon Modbus standard / Simple communication protocol	
Standard	EIA RS-485	EIA RS-232C
Circuit structure diagram	<p>The diagram shows the internal circuitry for EIA RS-485. It features a 9-pin connector with pins 1, 5, and 9 labeled SD+, SG, and SD- respectively. The internal circuit block is connected to these pins, and the diagram shows the connection to 'This product' and 'Your system'.</p>	<p>The diagram shows the internal circuitry for EIA RS-232C. It features a 9-pin connector with pins 2, 3, and 5 labeled RD, SD, and SG respectively. The internal circuit block is connected to these pins, and the diagram shows the connection to 'This product' and 'Your system'.</p>

HRS050-W*-20-(BJM)



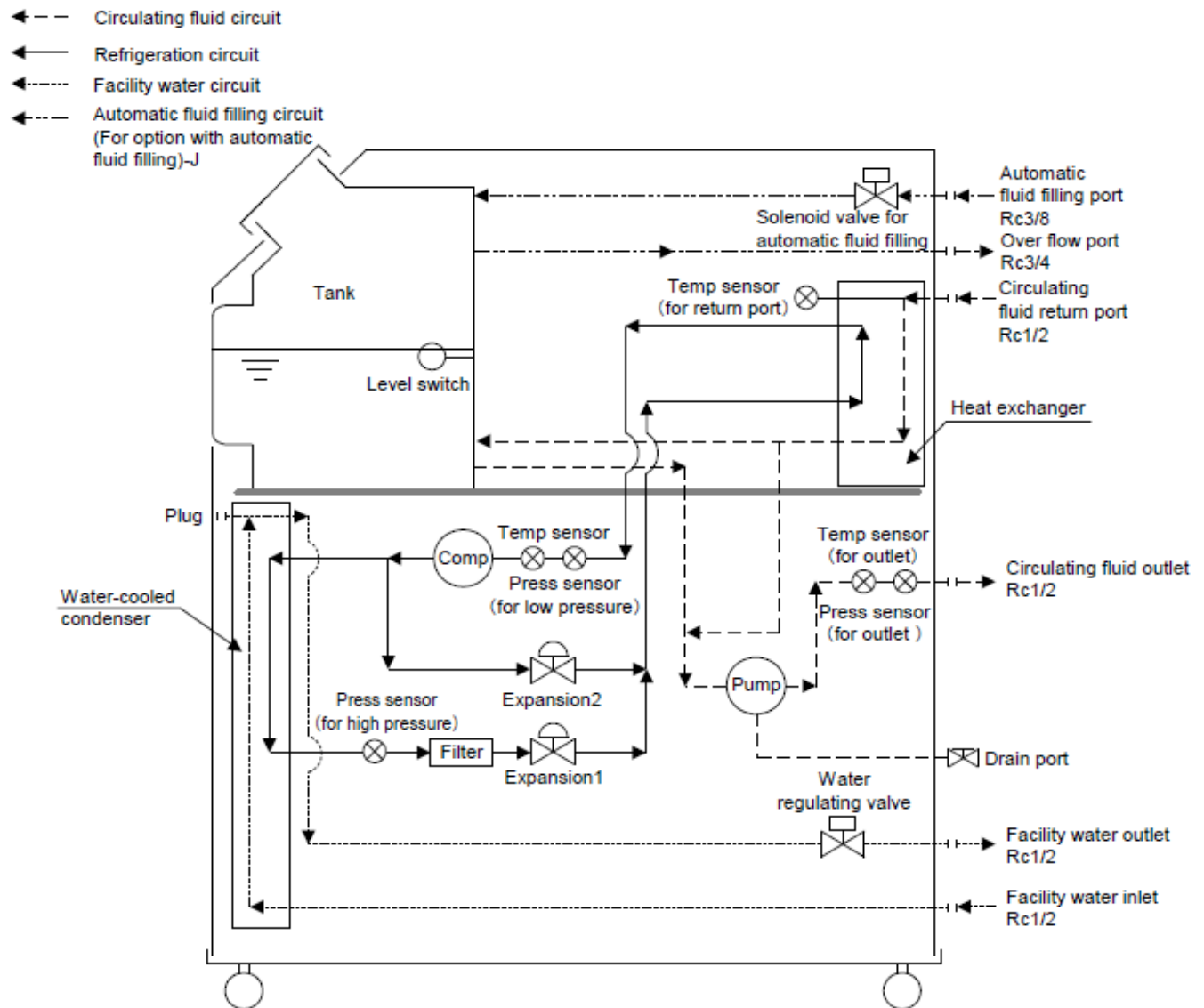


Fig. 8-3 Flow Chart(HRS050-W*-20-(BJM))



Cooling capacity HRS050-**-20-(BJM)

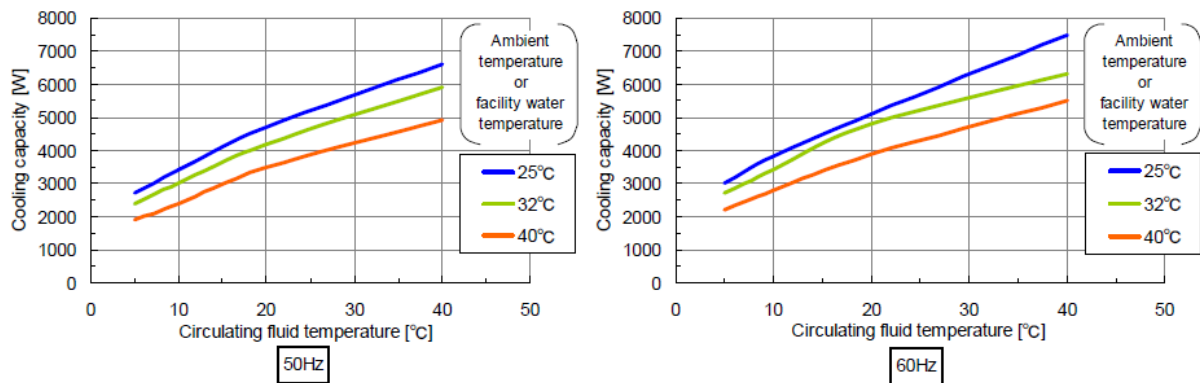


Fig. 8-4 Cooling capacity(HRS050-**-20-(BJM))

Pump capacity HRS050-**-20-(BJM)

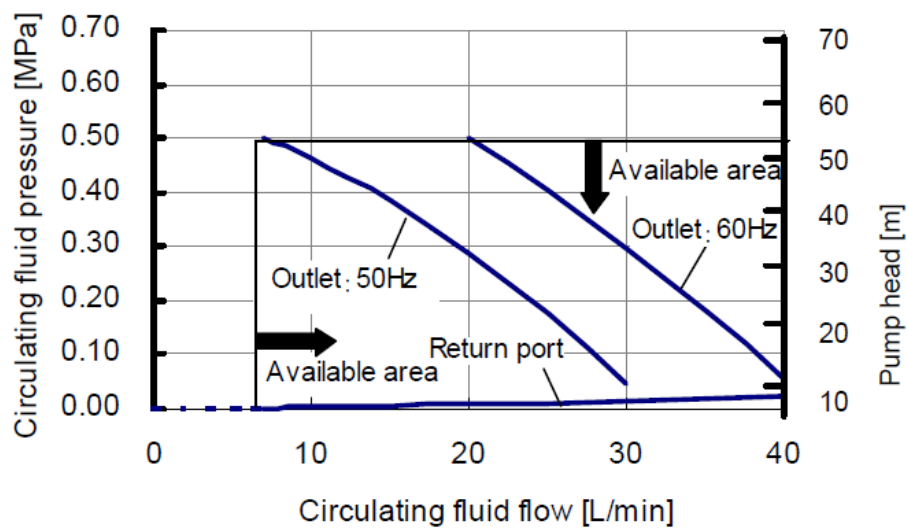


Fig. 8-5 Pump capacity(HRS050-**-20-(BJM))

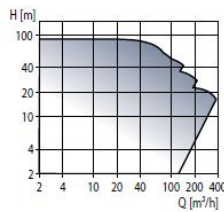


I.IV. BOMBA



TPE Series 1000

Single-stage, centrifugal pumps - electronically controlled



Technical data

Flow, Q: max. 370 m³/h
Head, H: max. 90 m
Liquid temp.: -25°C to +120°C
Op. press: max. 16 bar

Applications

The pumps are suitable for liquid transfer in

- District heating plants
- Cooling and air-conditioning systems
- Industrial plants

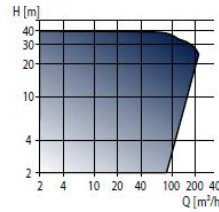
Features and benefits

- Low-energy
- Adaptation to existing operating conditions
- Simple installation
- Many control facilities
- Wireless remote control, R100
- Communication via GENIbus or LON



TPE Series 2000

Single - stage, centrifugal pumps - electronically controlled



Technical data

Flow, Q: max. 230 m³/h
Head, H: max. 41 m
Liquid temp.: -25°C to +120°C
Op. press: max. 16 bar

Applications

Circulation of hot or cold water in

- Heating systems
- Domestic hot water systems
- Cooling and air-conditioning systems

Features and benefits

- Low-energy
- Adaptation to existing operating conditions
- Simple installation

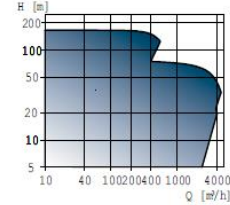
Options

- Wireless remote control, R100
- Communication via GENIbus, BACnet MS/TP, LON, Modbus RTU or Profibus DP
- Twin-head versions



TP

Circulator pumps, close-coupled type



Technical data

Flow, Q: max. 4600 m³/h
Head, H: max. 170 m
Liquid temp.: -25°C to +120°C
Op. press: max. 25 bar

Applications

Circulation of hot or cold water in

- Heating systems
- District heating plants
- Local heating plants
- Domestic hot water systems
- Cooling and air-conditioning systems

Features and benefits

- Compact design
- Wide range
- Standard motor
- Service-friendly
- Various types of shaft seals depending on liquid, temperature and pressure

Options

- Bronze pump housing
- Twin-headed versions



I.V. VÁLVULAS AUTOMÁTICAS

AVM 105S, 115S: Actuator with SAUTER Universal Technology (SUT)

How energy efficiency is improved

Automatic adaptation to valve, precision control and high energy efficiency with minimal operating noise.

Areas of application

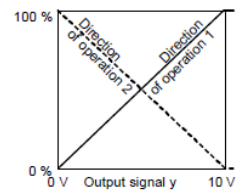
Actuation of through and three-way valves of the VUN/BUN, VUD/BUD and VUE/BUE series (DN15 to DN50). For controllers with continuous output (0...10 V) or switching output (2-point or 3-point control).

Features

- Pushing force 250 N (AVM 105S) or 500 N (AVM 115S)
- Stepping motor with SUT (SAUTER Universal Technology) electronic control unit and electronic load-dependent cut-off
- Automatic detection of control signal applied (continuous or switching)
- The type of characteristic curve (linear, quadratic or equal percentage) can be set in the actuator
- Independent adaptation to valve stroke
- Direction of travel can be set on cable
- Coding switch for selection of characteristic and running time (35, 60 or 120 s)
- Maintenance-free transmission with magnetic clutch
- Transmission can be disengaged for positioning the valve manually (Allen key included)
- Assembly with valve is done automatically after control voltage is applied

Technical description

- 24 V~ or 24 V~/= power supply
- Two-part housing made of fire-retardant plastic; lower section black, upper section yellow
- Console made of glass-fibre-reinforced plastic
- Brass box nut for fitting valve
- Connecting cable 1.2 m long, 5 × 0.75 mm²
- Installation position: vertical to horizontal, but not upside down



Type	Running time [s]	Stroke ²⁾ [mm]	Pushing force [N]	Power	Weight [kg]
For valves with equal-percentage characteristic, can be switched over to linear					
AVM 105S F132	35/60/120	8.0	250	24 V~/=	0.7
AVM 115S F132	60/120	8.0	500	24 V~/=	0.7
Positioner ¹⁾					
Control signal	0...10 V, R _i > 100 kΩ		Starting point U ₀	0 or 10 V	
Positional feedback signal	0...10 V, load > 10 kΩ		Control span ΔU	10 V	
			Switching range X _{sh}	200 mV	
Power supply	24 V~ 24V=	± 20%, 50/60 Hz +20% / -10%	Degree of protection (horizontal)	IP 54 as per EN 60529	
Power consumption			Protection class	III as per IEC 60730	
AVM 105S F132	4.8 W	8.5 VA	Response time ¹⁾	200 ms	
AVM 115S F132	4.9 W	8.7 VA			
Max. media temperature	100 °C		Wiring diagram	A09673	
Ambient temperature	-10...55 °C		Dimension drawing	M09743	
Ambient humidity	5...95% rh without condensation		Fitting instructions 1 . 5S	MV 506065	
			Material declaration	MD 51.362	
For control valve type KTM512 / TA-Regulator DN 15...50					
Type	Running time [s]	Stroke [mm]	Pushing force [N]	Power	Weight [kg]
AVM 115S F901	80/160	10.0	500	24 V~	0.7
Deviation from standard type: inverse scale therefore inverse direction of operation. Adaptor for control valve available on the valve or from TA-Regulator, stating reference no. 52 757 003.					
¹⁾ Also for 2-point or 3-point, depending on type of connection					
²⁾ Maximum stroke of drive = 10.0 mm					



Engineering and fitting notes

The ingress of condensate, drops of water etc. along the valve spindle and into the drive should be prevented.

With the electrical connection, you must also make sure that the cross-section of the supply line is adapted to the power and length. In any case, however, we recommend that the cross-section should not be less than a minimum of 0.75 mm².

The assembly of actuator and valve is done by fitting and tightening the cap nut without further adjustment; no tools should be used. The valve spindle and the drive spindle are coupled together automatically, either by using the manual adjustment facility or by applying power. When dismantling, first release the drive/valve spindle, then loosen the cap nut.

The actuator is supplied ex works in the middle position.

The combination of stepping motor and electronics unit allows several actuators of the same SUT type to be run in parallel.

The following accessories can be fitted to each actuator: one set of auxiliary contacts.

The coding switches are accessible via an opening with black lid in the housing cover.

The auxiliary contacts should be screwed onto the drive's top cover. Before the mechanical connection can be established, the indicator knob should be removed. A new indicator is then visible on the lid of the auxiliary contacts.

N.B.: The housing should not be opened.

Fitting outdoors

If the devices are fitted outdoors, we recommend that additional measures be taken to protect them against the effects of the weather.

Additional technical data

The upper part of the housing, with the lid, indicator knob and the cap, contains the stepping motor and the SUT electronic control unit. The lower part contains the maintenance-free transmission.

Auxiliary change-over contacts

Switch rating: max. 230 V a.c.; min. current 20 mA at 20 V

Switch rating: max. 4...30 V d.c.; current 1...100 mA

Power consumption:

Type	Running time [s]	Condition	Active power P [W]	Apparent power S [VA]
AVM 105S F132	35	Operating	2.45	4.75
		Standstill	0.35	0.8
	60	Operating	4.8	8.5
		Standstill	0.35	0.8
	120	Operating	2.2	4.25
		Standstill	0.35	0.8
AVM 115S F132	60	Operating	4.9	8.7
		Standstill	0.35	0.75
	120	Operating	2.25	4.3
		Standstill	0.35	0.75

CE conformity

EMC Directive 2004/108/EC

EN 61000-6-1

EN 61000-6-3

EN 61000-6-4



AVM 1.5 S



372145, 372286

Technical drawing showing side and front views of a pressure washer. Dimensions include: 63, 45,6, 43,5, 107,1, 122, 126,7, 35, 32, 70, 46,5, 23,5, and M09743b.

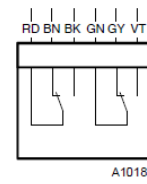
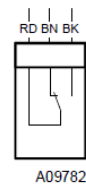
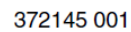
0372249 001

Technical drawing showing front and side views of a pressure washer. Dimensions include: 15, 5, 60, 32, 2,5, 10, 55,8, 8, 16, 42, 33, and Z10214.

372273

Technical drawing showing side and front views of a pressure washer. Dimensions include: 2,5, 3,2, 15,5, 8, 10, 10, 4, 24, 26,5, 30, 33, 26,7, 8, and M10202.

0313529



I.VI. ARMAFLEX

Armaflex - Protects Your Investment

The professional insulation with the "inbuilt water-vapour-barrier"

With its exceptional, inbuilt, water vapour barrier Armaflex is particularly effective at preventing moisture ingress and ensuring long term thermal efficiency. The thermal properties of Armaflex will not rapidly deteriorate over time as other insulation materials may and, by keeping moisture as far from the pipe surface as possible, Armaflex reduces the risk of expensive under insulation corrosion.

The in built water vapour of Armaflex comes from its closed cell structure. Armaflex comprises thousands of interconnected closed cells, each with an inherent resistance to water ingress. As such the vapour barrier of Armaflex cannot be compromised by surface punctures or tears.

In addition Armaflex is dust and fibre free. It will not emit any particles or fibres, even when cut into shapes and fittings.

Armaflex can be easily and cost effectively fabricated into valve and flange boxes on site, allowing for the protection of these vulnerable components and the creation of a fully sealed system at significantly reduced cost.

Where industries have specific requirements Armaflex is often available in specialized variants which meet the need. This includes a high temperature Armaflex suitable for use on heating and process lines in excess of 105°C. All Armaflex variants are manufactured to the highest levels of quality making Armaflex a product that can truly protect your investment.



II. CALENTAMIENTO

II.I. MANTAS TÉRMICAS

Improve Heat Transfer, Speed Warm Ups and Decrease Wattage Requirements

Rugged, yet thin, lightweight and flexible —the use of Watlow® silicone rubber heaters is limited only by the imagination. With these heaters, heat can be placed where it is needed. In the application process these heaters improve heat transfer, speed warm ups and decrease wattage requirements.

Fiberglass-reinforced silicone rubber gives the heater dimensional stability without sacrificing flexibility. Because very little material separates the element from the part, heat transfer is rapid and efficient. The heaters are constructed with a wire-wound element or an etched foil element. The heater construction creates a very thin heater allowing it to fit applications where space is limited.

Performance Capabilities

- Operating temperatures up to 500°F (260°C)
- Watt densities up to 80 W/in² (12.5 W/cm²), dependent upon application temperature
- Wire-wound element thickness — 0.055 in. (1.4 mm)
- Etched foil element — 0.022 in. (0.56 mm)
- UR®, cUR®, VDE and CE recognitions are available on many designs up to 428°F (220°C)

Features and Benefits

Designed to the exact shape and size needed

- Conforms to your component and/or equipment

More than 80 designs available immediately from stock

- Reduces downtime

Constructed with wire-wound or etched foil elements

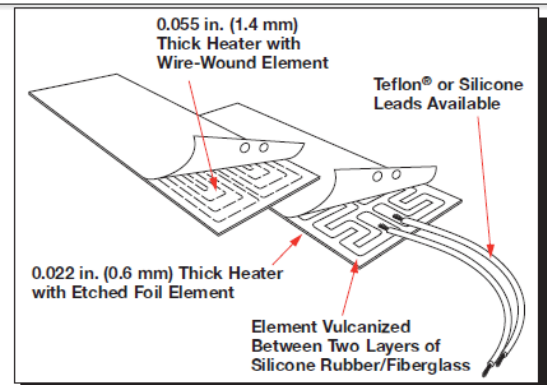
- Delivers a thin, lightweight heater
- Provides the desired flexibility for many dynamic applications
- Delivers low mass and easily repeatable distributed watt densities

Moisture- and chemical-resistant silicone rubber material

- Provides longer heater life

Vulcanizing adhesives or fasteners

- Allows heaters to be easily bonded to the part



Typical Applications

- Freeze protection and condensation prevention for many types of instrumentation and equipment
- Medical equipment such as blood analyzers and test tube heaters
- Computer peripherals such as laser printers
- Curing of plastic laminates
- Photo processing equipment
- Semiconductor processing equipment

Mounting Methods

- Pressure Sensitive Adhesive Surface (PSAS)
- Silicone contact cement kit
- Field applied adhesive
- Mechanical fasteners
- Factory bonding



Termination Styles

Watlow offers many types of leads and terminations. Leads can project from any position along the perimeter of the unit. **They will be centered on the short side width of rectangular heaters unless otherwise specified.**

Teflon® UL® 1180 CSA



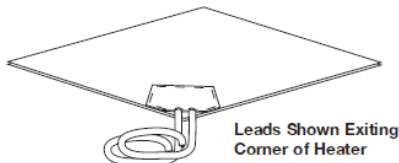
Watlow's leads are 12 in. (305 mm) long, white, Teflon® insulated, flexible, plated copper UL® 1180 CSA wire. They are rated for 392°F (200°C)/300V. The lead connections on or at the heater are insulated with a cap of sheath material, vulcanized to the heater body.

Teflon® Leads



Teflon® Type E (MIL-W-16878) and Teflon® UL® 1199 rated for 392°F (200°C)/600V are also available.

Silicone Insulated Leads



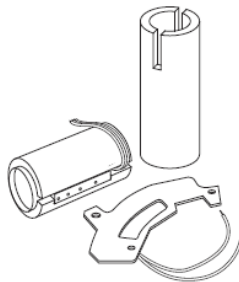
For a better moisture seal, specify UL® silicone insulated lead wires. This lead type is rated for 302°F (150°C)/ 600V. Any lead length is available. **Note:** Silicone rubber heaters are not designed to be waterproof. Excess exposure to moisture may facilitate premature heater failure.

Option

Thermal Insulation

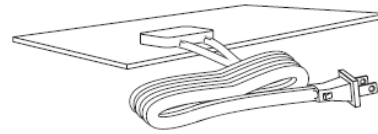
To increase the heating efficiency of your application, silicone rubber heaters can be thermally insulated with silicone sponge rubber, bonded to one side in the following thicknesses: $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{8}$ or $\frac{1}{2}$ in. (1.6, 3.2, 6, 9.5 or 13 mm)

An aluminized surface can be added to the back of the heater to reduce radiated heat losses. This aluminized surface, called "low loss treatment," adds very little to the unit thickness and maintains a very clean appearance.



Extended Capability Termination Style

HPN Cord and Plug Set

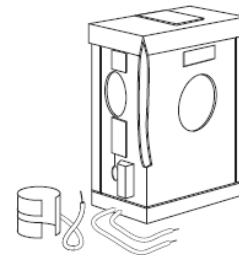


Molded Leads are Shown Exiting Edge of Heater. Capped Leads are also Available

For removable heaters, a 6 ft (1.8 m) HPN cord and plug set provides convenience. It is rated for 194°F (90°C)/ 300V. HPN cord without a plug is also available in any length.

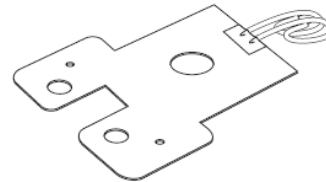
Extended Capability Options

Formed Heaters



Many three-dimensional shapes, such as cylinders, cones and boxes, can be factory formed. Semi-rigid shapes can be self-gripping to the part. Special tooling may be required for some designs.

Holes, Cutouts and Notches



Watlow can provide flexible heaters with special holes, cutouts and notches in nearly any position required for your design. The resistance element can be brought to within $\frac{1}{8}$ in. (3.2 mm) of all edges. Standard spacing is $\frac{1}{4}$ in. (6 mm) from all edges.

Watlow® is a registered trademark of Watlow Electric Manufacturing Company. Teflon® is a registered trademark of E.I. duPont de Nemours & Company. UR® and cUR® are registered trademarks of Underwriter's Laboratories, Inc.

To be automatically connected to the nearest North American Technical Sales Office:

1-800-WATLOW2 • www.watlow.com • inquiry@watlow.com

International Technical Sales Offices: Australia, +61 3 9335 6449 • China, +86 21 3381 0188 • France, +33 1 41 32 79 70
Germany, +49 (0) 72 53 / 94 00-0 • Italy, +39 024588841 • Japan, +81 3 3518 6630 • Korea, +82 2 2628 5770
Malaysia, +60 3 8076 8745 • Mexico, +52 442 217 6235 • Singapore, +65 6773 9488 • Spain, +34 91 675 12 92
Taiwan, +886 7 288 5168 • United Kingdom, +44 (0) 115 964 0777



II.II. AUTOTRANSFORMADOR



INSTALACION Y CONEXIONES

Antes de la puesta en marcha, comprobar que las conexiones son correctas y que la tensión de la red se corresponde con la del aparato.

Recomendamos, su protección, a la salida, con fusibles lentos de I_{nx} 1,1 ó magneto-térmicos, adecuados a la corriente nominal del auto-transformador, que eviten un funcionamiento con sobrecargas por periodos prolongados.

Al poner en marcha por primera vez, comprobar que la corriente que pasa por los cursores no sobrepasa la nominal, en ningún punto del recorrido.

Siempre que sea posible, se instalarán los auto-transformadores con la pista hacia abajo, para evitar que se produzcan acumulaciones de polvo sobre ellas.

Conexión de los auto-transformadores monofásicos:

1-3 Borne alimentación, cuando hay elevación en la tensión de salida respecto a la de entrada.

1-4 Borne alimentación cuando no hay elevación en la tensión de salida respecto a la entrada.

1-2 Borne de salida, en ambos casos.

Conexión de los auto-transformadores trifásicos:

Para la conexión trifásica en estrella, conectar los tres bornes $n^{\circ}1$ en paralelo y constituyen el neutro.

La entrada la constituyen el neutro y los tres bornes $n^{\circ}4$ (para modelos sin elevación) ó los tres bornes $n^{\circ}3$ (para modelos con elevación).

La salida, en ambos casos, la constituyen el neutro y los tres bornes $n^{\circ}2$.

Conexión equipos motorizados:

Independientemente de la conexión propia de los auto-transformadores variables, los equipos con regulación motorizada disponen de tres bornes de conexión en la parte superior del equipo, correspondientes a la alimentación del moto-reductor.

Para aumentar la tensión de salida en el variador de tensión, se debe aplicar tensión 230 VAC entre los bornes con cables de colores: Violeta-Gris.

Para disminuir la tensión de salida en el variador, se debe aplicar tensión 230 VAC entre los bornes con cables de colores: Naranja-Gris.

ivac

MANTENIMIENTO

El mantenimiento más habitual de los auto-transformadores variables se centra en el control y cuidado de la pista bobinada y de las escobillas. En los equipos motorizados se debe vigilar el estado de los microscopios fin de carrera y el de los piñones a la salida del moto-reductor.

Recomendamos una o dos veces por año, según su utilización y ubicación:

- Limpiar las pistas con un cepillo, para quitar el polvo y posteriormente con un paño humedecido con alcohol.
- Si en la pista se aprecian puntos oxidados (síntoma de haber trabajado con suciedad ó sobrecargas), pulir con tela esmeril, extra fina (00) o con una goma de porrar dura, hasta lograr que la pista quede brillante. Posteriormente es conveniente repasarla con un paño ligeramente impregnado de aceite mineral.
- Engrasar, si fuera necesario, los piñones de transmisión.
- Comprobar que los microscopios fin de carrera funcionan correctamente, están bien anclados y accionan con una pequeña anticipación a los topes mecánicos.
- Revisar el aspecto de los cables por si se perciben sobretensiones o falsas conexiones.
- Comprobar el estado de las escobillas, su aspecto y su correcto deslizamiento y, en caso de desgaste excesivo, sustituirlos.

En caso de dudas, contacte con el servicio técnico de TORIVAC.



ivac

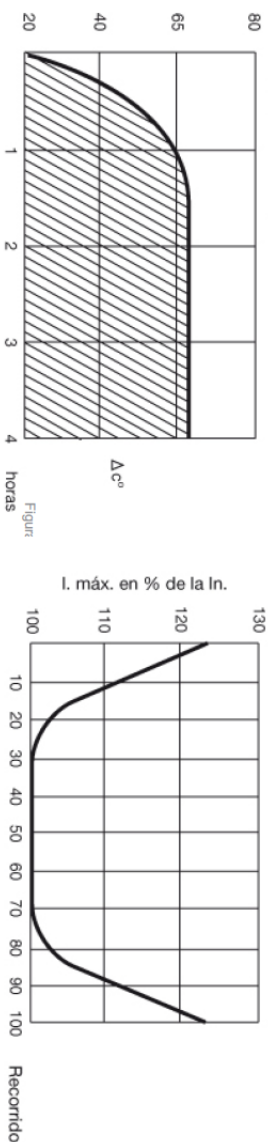
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

El variador de tensión consta principalmente de un núcleo toroidal fabricado con plancha magnética de muy bajas pérdidas y alta permeabilidad, bobinado en un ángulo de aprox. 340°. La pista de contacto está formada por un bobinado uniforme, rectificado, pulido y tratado con un baño de plata, para mejorar el contacto con la escobilla de grafito.

Este tratamiento permite reducir la resistencia de contacto y la oxidación del cobre lo que redundará en una vida más larga del variador de tensión.

Los siguientes factores contribuyen a que nuestros variadores de tensión trabajen con una efectividad y duración óptima:

- * Un elevado número de espiras por voltio, nos permite regular valores de tensión muy precisos.
- * El encapsulado en resina de epoxi mejora la disipación de calor, evitando que éste se concentre en el punto de contacto de la escobilla (como ocurre con los variadores de bobinado al aire) y además protege físicamente al variador de las agresiones atmosféricas de ciertos ambientes nocivos.
- * Los contactos de fricción interiores y exteriores están diseñados generosamente para que disipen el máximo calor posible con el mínimo desgaste.
- * Tanto las motorizaciones como los topes mecánicos han sido sometidos a ensayos de resistencia mecánica que garantizan su eficacia en las diferentes aplicaciones.
- * Los variadores de tensión toroidales no deforman la onda senoidal.
- * El incremento de temperatura en las partes externas no metálicas oscila entre 45°C y 60°C, sobre temperatura ambiente a plena carga (Fig. 2), no obstante existen medios para reducir esta temperatura, como el baño en cuba de aceite o refrigeración mediante ventilador, aunque estos sistemas suelen emplearse para variadores de grandes potencias.
- * Los variadores de tensión permiten regular el voltaje sin sobrepasar la intensidad nominal salvo al inicio y final del recorrido que se puede sobrepasar hasta un 22 %, según el gráfico de la fig. 3.



III. INSTRUMENTACIÓN

III.I. CAUDALÍMETRO DE EFECTO CORIOLIS

Micro Motion F-Series flow and density meters

Micro Motion Coriolis meters meet a vast range of application needs, ranging from extreme low-flow up to high-flow, high-capacity lines. Cryogenic, hygienic, high-temperature, and high-pressure—Micro Motion meters can handle them all. Micro Motion meters are available with a variety of wetted parts to ensure the best material compatibility. Now with the industry's only 2-wire Coriolis option, Micro Motion provides unsurpassed simplicity of installation and application flexibility.

Coriolis meters. Coriolis meters offer dramatic benefits over traditional volumetric measurement technologies. Coriolis meters:

- Deliver accurate and repeatable process data over a wide range of flow rates and process conditions.
- Provide direct inline measurement of mass flow and density, and also measure volume flow and temperature—all from a single device.
- Have no moving parts, so maintenance costs are minimal.
- Have no requirements for flow conditioning or straight pipe runs, so installation is simplified and less expensive.
- Provide advanced diagnostic tools for both the meter and the process.

F-Series Coriolis meters. Micro Motion F-Series Coriolis meters have a compact design that fits into tight spaces while offering highly accurate flow and density measurement for virtually any process fluid. With F-Series meters, expensive recalibrations become a thing of the past—a single F-Series calibration is valid for liquids, gases, and slurries.

The accumulated knowledge of Micro Motion is built into every F-Series meter. Now with Smart Meter Verification, F-Series meters deliver outstanding reliability and ease of use for critical applications F-Series meters are available with either stainless steel or nickel-alloy wetted parts, allowing you to choose the material that is most compatible with your process fluid. And certain F-Series models are available for high-temperature and high-pressure applications.



Liquid flow performance

		Mass		Volume ⁽¹⁾	
		lb/min	kg/h	gal/min	l/h
Maximum flow rate	F025	100	2720	12	2720
	F050	300	8160	36	8160
	F100	1200	32,650	144	32,650
	F200	3200	87,100	384	87,100
	F300	10,000	272,000	1200	272,000
Mass flow accuracy ^{(2) (3)}		±0.10% of rate ⁽⁴⁾⁽⁵⁾			
Volume flow accuracy ^{(2) (3)}		±0.15% of rate ⁽⁶⁾⁽⁷⁾			
Repeatability		±0.05% of rate ⁽⁴⁾			
		lb/min	kg/h	gal/min	l/h
Zero stability	F025	0.0065	0.1765	0.0008	0.1765
	F050	0.020	0.544	0.002	0.544
	F100	0.080	2.177	0.010	2.177
	F200	0.256	6.965	0.031	6.965
	F300	0.80	21.76	0.096	21.76

(1) Volumetric measurement is based on a process-fluid density of 1 g/cm³. For fluids with density other than 1 g/cm³, the volume flow rate equals the mass flow rate divided by the fluid's density.

(2) Stated flow accuracy includes the combined effects of repeatability, linearity, and hysteresis.

(3) Accuracy options vary by model. Sensors with Model 2200S transmitter have fewer accuracy options. See Ordering information on page 39.

(4) When flow rate < (zero stability / 0.001), then mass flow accuracy = ±[(zero stability / flow rate) × 100]% of rate and repeatability = ±½[(zero stability / flow rate) × 100]% of rate.

(5) When ordered with the 0.15% calibration option, mass flow accuracy on liquid = ±0.15% when flow rate ≥ (zero stability / 0.0015). When flow rate < (zero stability / 0.0015), then accuracy = ±[(zero stability / flow rate) × 100]% of rate. When ordered with the 0.20% calibration option, mass flow accuracy on liquid = ±0.20% when flow rate ≥ (zero stability / 0.0020). When flow rate < (zero stability / 0.0020), then mass flow accuracy on liquid = ±[(zero stability / flow rate) × 100]% of rate.

(6) When flow rate < (zero stability / 0.001), then volume flow accuracy on liquid = ±[1.5 × (zero stability / flow rate) × 100]% of rate and repeatability = ±½[(zero stability / flow rate) × 100]% of rate.

(7) When ordered with the ±0.15% calibration option, volume flow accuracy on liquid = ±0.25% when flow rate ≥ (zero stability / 0.0017). When flow rate < (zero stability / 0.0017), then volume accuracy on liquid = ±[1.5 × (zero stability / flow rate) × 100]% of rate. When ordered with the ±0.20% calibration option, volume flow accuracy on liquid = ±0.30% when flow rate ≥ (zero stability / 0.002). When flow rate < (zero stability / 0.002), then volume accuracy on liquid = ±[1.5 × (zero stability / flow rate) × 100]% of rate.

Density performance (liquid only)

Accuracy ⁽¹⁾	±0.001 g/cm ³	±1.0 kg/m ³
Repeatability	±0.0005 g/cm ³	±0.5 kg/m ³
Range	Up to 5 g/cm ³	Up to 5000 kg/m ³

(1) Stated accuracy and repeatability with calibration option 1 (see page 40). With other calibration options, accuracy is ±0.002 g/cm³ (2.0 kg/m³) and repeatability is ±0.001 g/cm³ (±1.0 kg/m³).



Temperature specifications

Accuracy	All models	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\%$ of reading in $^{\circ}\text{C}$
Repeatability	All models	$\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperature limits⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	All models except high-temperature models	

Mount electronics remotely; use junction box

140 (60)

81 (27)

Mount electronics remotely; use junction box*

Ambient temperature of core processor or transmitter in $^{\circ}\text{F}$ ($^{\circ}\text{C}$)

Maximum process temperature in $^{\circ}\text{F}$ ($^{\circ}\text{C}$)

* When ambient temperature is below $-40\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), a core processor must be heated to bring its local ambient temperature to between $-40\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) and $+140\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($+60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Long-term storage of electronics at ambient temperatures below $-40\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) is not recommended.

High-temperature models	<p>Ambient temperature: $-40\text{ to }+140\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-40\text{ to }+60\text{ }^{\circ}\text{C}$)</p> <p>Process temperature: $-50\text{ to }+662\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-40\text{ to }+350\text{ }^{\circ}\text{C}$)</p>
-------------------------	--

- (1) Temperature limits may be further restricted by hazardous area approvals. See pages 15–20.
- (2) For F300 sensors, the difference between the process fluid temperature and the average temperature of the case must be less than $120\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($66\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- (3) The extended mount option allows the sensor case to be insulated without covering the transmitter, core processor, or junction box, but does not affect temperature ratings.

F-Series Coriolis Flow and Density Meters



Pressure ratings

All pressure ratings are based on ASME B31.3.

PED compliance

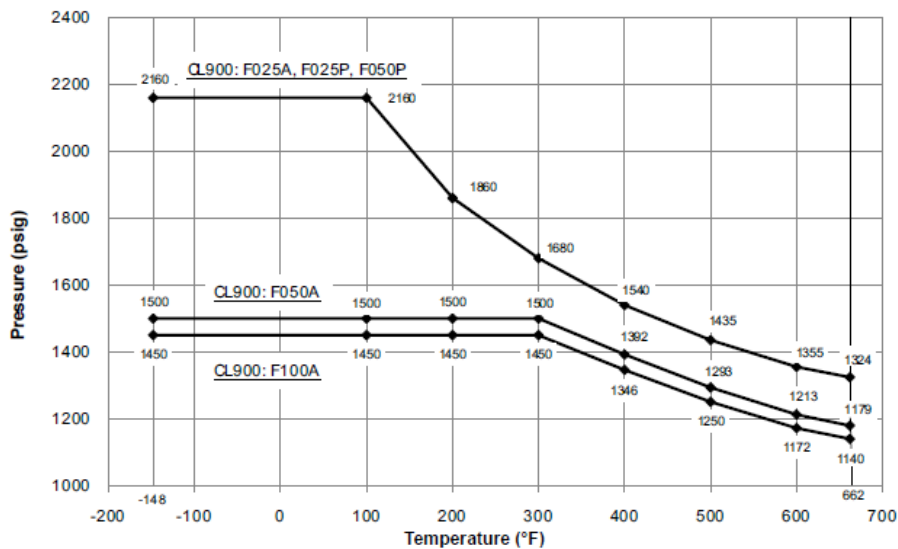
Sensors comply with council directive 97/23/EC of 29 May 1997 on Pressure Equipment

		ASME B31.3 secondary containment rating		Burst pressure used to determine ASME B31.3 secondary containment rating	
		psig	bar	psig	bar
Housing rating ⁽¹⁾	F025	166	11.4	1884	130
	F050	135	9.3	1530	105
	F100	109	7.5	1281	88.3
	F200	64	4.4	760	52.4
	F300	256	17.7	2630	180

(1) Sensor housing is rated only when the secondary containment case option is purchased. The secondary containment case option is not available on high-temperature sensors.

Sensor pressure/temperature rating with ASME B16.5 F316/316L weldneck flanges

Models F025A through F100A; Model F025P; Model F050P

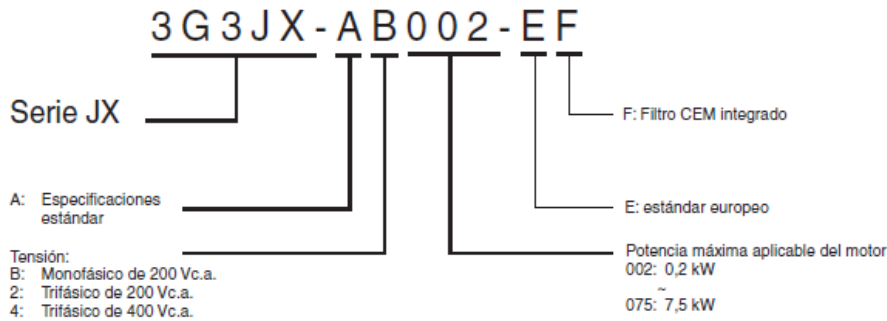


F-Series Coriolis Flow and Density Meters



III.II. VARIADOR DE FRECUENCIA

Denominación de tipo



Clase 200 V

Monofásico: 3G3JX□			AB002	AB004	AB007	AB015	AB022	–	–	–
Trifásico: 3G3JX□			A2002	A2004	A2007	A2015	A2022	A2037	A2055	A2075
Motor kW ¹	Capacidad de motor aplicable		0,2	0,4	0,75	1,5	2,2	3,7	5,5	7,5
Características de salida	Capacidad del convertidor kVA	200 V	0,4	0,9	1,3	2,4	3,4	5,5	8,3	11,0
		240 V	0,5	1,0	1,6	2,9	4,1	6,6	9,9	13,3
	Corriente nominal de salida (A)		1,4	2,6	4,0	7,1	10,0	15,9	24,0	32,0
	Tensión máxima de salida		Proporcional al voltaje de entrada: 0...240 V							
	Frecuencia de salida máx.		400 Hz							
Fuente de alimentación	Tensión y frecuencia nominales de entrada		Monofásico de 200...240 V, 50/60 Hz Trifásico de 200...240 V, 50/60 Hz							
	Corriente nominal de entrada (A) trifásica 200 V.		1,8	3,4	5,2	9,3	13,0	20,0	30,0	40,0
	Corriente nominal de entrada (A) monofásica 200 V.		3,1	5,8	9,0	16,0	22,5	–	–	–
	Fluctuaciones de tensión admisibles		–15%...+10%							
	Fluctuaciones de frecuencia admisibles		+5%							
Filtro integrado			Filtro CEM (C1 modelo monofásico)							
Par de freno		En deceleración rápida En realimentación del condensador	Aprox. 50%			50% para Trifásico del 20 al 40% para monofásico	Aprox. del 20% al 40%		Aprox. 20%	
Método de refrigeración			Autorrefrigerado			Ventilación forzada				

¹ Basado en un motor estándar trifásico.

Clase 400 V

Trifásico: 3G3JX□			A4004	A4007	A4015	A4022	A4040	A4055	A4075
Motor kW ¹	Capacidad de motor aplicable		0,4	0,75	1,5	2,2	4,0	5,5	7,5
Características de salida	Capacidad del convertidor kVA	380 V	0,9	1,6	2,5	3,6	5,6	8,5	10,5
		480 V	1,2	2,0	3,1	4,5	7,1	10,8	13,3
	Corriente nominal de salida (A)		1,5	2,5	3,8	5,5	8,6	13,0	16,0
	Tensión máxima de salida		Proporcional al voltaje de entrada: 0...480 V						
	Frecuencia de salida máx.		400 Hz						
Fuente de alimentación	Tensión y frecuencia nominales de entrada		Trifásico 380...480 V, 50/60 Hz						
	Corriente nominal de entrada (A)		2,0	3,3	5,0	7,0	11,0	16,5	20,0
	Fluctuaciones de tensión admisibles		-15%...+10%						
	Fluctuaciones de frecuencia admisibles		+5%						
Filtro integrado			Filtro CEM clase C2						
Par de freno		En deceleración rápida En realimentación del condensador	Aprox. 50%		Aprox. del 20% al 40%			Aprox. 20%	
Método de refrigeración			Autorrefrigerado		Ventilación forzada				

¹ Basado en un motor estándar trifásico.



Especificaciones comunes

Número de modelo 3G3JX□		Especificaciones
Funciones de control	Métodos de control	Modulación por ancho de pulsos (PWM) senoidal fase a fase (V/f)
	Rango de frecuencia de salida	0,5..400 Hz
	Precisión de frecuencia	Valor digital seleccionado: $\pm 0,01\%$ de frecuencia máxima Valor analógico seleccionado: $\pm 0,4\%$ de la frecuencia máxima ($25 \pm 10^\circ\text{C}$)
	Resolución del valor de frecuencia seleccionado	Valor digital seleccionado: 0,1 Hz Valor analógico seleccionado: 1/1.000 de frecuencia máxima
	Resolución de la frecuencia de salida	0,1 Hz
	Capacidad de sobrecarga	150% de la corriente nominal de salida durante un minuto
	Selección de referencia de frecuencia	De a 10 Vc.c. (10 k Ω), de 4 a 20 mA (250 Ω), potenciómetro de selección de frecuencia (seleccionable), Modbus RS485
	Características V/f	Par constante/reducido
Funcionalidad	Señales de entrada	FW (directa), RV (inversa), de CF1 a CF4 (multivelocidad), JG (jog), DB (frenado por inyección de c.c. externa), SET (segunda función), 2CH (segunda aceleración/deceleración), FRS (marcha libre), EXT (fallo externo), USP (función USP), SFT (bloqueo de software), AT (selección de entrada de corriente analógica), RS (reset), PTC (entrada de termistor), STA (arranque a 3 hilos), STP (parada a 3 hilos), F/R (marcha directa/inversa a 3 hilos), PID (selección PID), PIDC (reset del valor integral de PID), UP (UP de función UP/DWN), DWN (DWN de función UP/DWN), UDC (borrar datos de función UP/DWN), OPE (modo OPE forzado), ADD (añadir frecuencia), F-TM (forzar bloque de terminales), RDY (listo para operación), SP-SET (configuración especial), EMR (parada de seguridad)
	Señales de salida	RUN (señal durante la operación), FA1 (señal de llegada de frecuencia 1), FA2 (señal de llegada de frecuencia 2), OL (señal de advertencia de sobrecarga), OD (señal de desviación excesiva de PID), AL (señal de alarma), DC (señal de detección de desconexión de entrada analógica), FBV (salida de estado de PID FB), NDc (error de red), LOG (resultado de operación lógica), ODc (opción de comunicación desconectada), LOC (señal de carga ligera)
	Funciones estándar	Función AVR, selección de características V/f, límite superior/inferior, 16 velocidades, ajuste de frecuencia de arranque, funcionamiento de jog, ajuste de frecuencia portadora, control PID, salto de frecuencias, ajuste analógico de desviación/ganancia, aceleración/deceleración de curva S, ajuste de nivel/características termoelectrónicas, función de reintento, refuerzo de par simplificado, histórico de fallos, función de bloqueo de software, visualización de la conversión de frecuencia, función USP, función de control secundario, velocidad de rotación de motor ASCENDENTE/DESCENDENTE
	Entradas analógicas	2 entradas analógicas de 0 a 10 V (20 k Ω), de 4 a 20 mA (250 Ω)
	Tiempos de aceleración/deceleración	De 0,01 a 3.000 s (selección de curva/lineal), disponibilidad de segunda rampa aceleración/deceleración
	Visualización	LED indicador de estado: Funcionamiento, programación, alimentación, alarma, Hz, Amps, potenciómetro Operador digital: Disponible para monitorizar la referencia de frecuencia, la corriente de salida y la frecuencia de salida
	Protección de sobrecarga del motor	Relé termoelectrónico de sobrecarga y entrada de PTC
Funciones de protección	Sobrecorriente instantánea	180% de corriente nominal
	Sobrecarga	150% durante 1 minuto
	Sobretensión	790 V para tipo 400 V y 395 para tipo 200 V
	Pérdida momentánea de alimentación	Se pueden seleccionar los siguientes parámetros: Alarma, inicio en 0 Hz, salida de frecuencia durante la interrupción o frecuencia máxima
	Sobrecalentamiento del ventilador de refrigeración	Supervisión de temperatura y detección de errores
	Nivel de prevención de bloqueo	Nivel seleccionable aplicable sólo a velocidad constante o durante la aceleración y la velocidad constante
	Fallo de puesta a tierra	Detectado al conectar la alimentación
	Indicación de carga	Activada cuando se suministra alimentación a la parte de control
Condiciones ambientales	Grado de protección	IP20
	Humedad ambiente	90% RH o menos (sin condensación)
	Temperatura de almacenamiento	De -20°C .. $+65^\circ\text{C}$ (temperatura temporal durante el transporte)
	Temperatura ambiente	De -10°C a 50°C (Tanto la frecuencia portadora como la corriente de salida deben reducirse por encima de 40°C .)
	Instalación	Interior (sin gas corrosivo, polvo, etc.)
	Altura de instalación	1.000 m máx.
Condiciones ambientales	Vibración	5,9 m/s ² (0,6 G), de 10 a 55 Hz (Cumple con el método de prueba especificado en JIS C0040 (1999)).



III.III. Termopares

Estos termopares versátiles, de bajo coste, se pueden utilizar para una gran variedad de aplicaciones de medida de temperatura en superficie, incluyendo pruebas ambientales, supervisión de temperatura de componentes electrónicos, temperatura de paredes de hornos, etc. La unión caliente del sensor se encuentra entre 2 láminas finas de poliamida de cristal fino reforzado para alta temperatura. Proporcionan soporte y aislamiento eléctrico al termopar además de proporcionar una superficie plana para poder fijarlo. Viene con 2 metros de cable de fibra de vidrio de 0.2mm de diámetro disponible en tipo K, T, J y N. Son fáciles de instalar utilizando tanto el adhesivo que incorpora como resina epoxy. Es necesario asegurarse que la resina resiste la temperatura a la que se va a trabajar.

- Termopar tipo K, T, J y N
- Tamaño de la lámina: 20mm x 10mm x 0.13mm de grosor
- 2 metros de cable de hilo sólido 2x0.2mm, paralelo aislado con fibra de vidrio
- Unión aislada
- Rango: -30°C a +220°C (picos hasta 300°C)

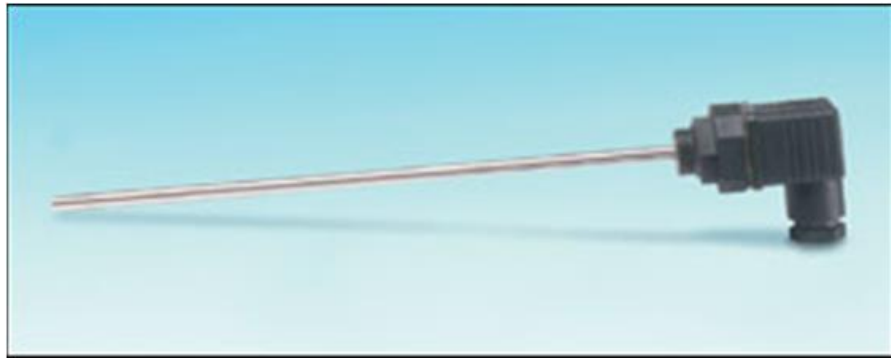


III.IV. SONDAS DE INMERSIÓN PT-100

■ Con conector Hirschman

Sensor con vaina rígida de acero inoxidable cerrada por un extremo. El elemento Pt100 situado en la punta de la vaina tiene una longitud de unos 10mm, para realizar una correcta medida la profundidad de inmersión deber ser al menos de 20mm. Terminado en conector Hirschmann que proporciona un fácil y rápido montaje, instalación y mantenimiento.

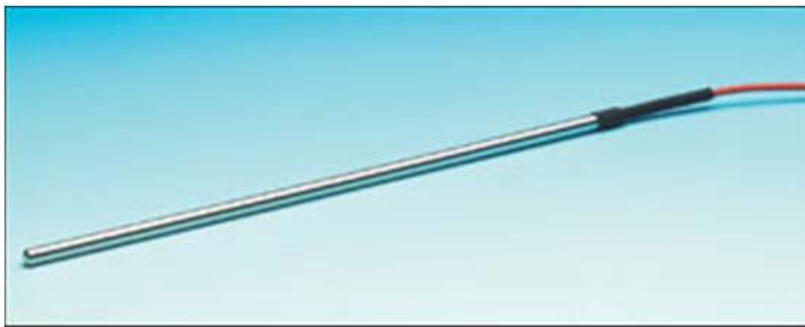
- Configuración a 3 hilos
- El elemento Pt100 cumple con la normativa IEC60751 Clase B
- Vaina de acero inoxidable 316 de 3mm ó 6mm de diámetro
- Varias longitudes disponibles
- Rango de funcionamiento: -50°C a 200°C



▪ De precisión

Esta sonda Pt100 permite efectuar medidas de temperatura muy precisas. Sonda de referencia cuya precisión es suficiente para la mayoría de las operaciones de control o calibración de otros sensores de temperatura. Se puede suministrar acompañado de un certificado de calibración.

- El elemento Pt100 cumple con la norma IEC 60751 clase 1/10
- Precisión: $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ (elemento sensor), $\pm 0.06^{\circ}\text{C}$ (sonda completa) a 0°C
- Configuración a 4 hilos, posibilidad a 3 hilos (no conectar uno de los conductores blancos)
- Se recomienda una profundidad mínima de inmersión de 150mm
- Longitud del elemento sensor: los primeros 20mm
- Rango de funcionamiento: -50°C a 250°C
- Vaina en acero inoxidable AISI 316, diámetro 3 ó 6mm con 250mm de longitud.
- Cable: 2 metros aislado con PFA.
- Disponible, como opción, de certificado de calibración UKAS en 3 puntos: 0°C , 100°C y 200°C o seleccionados por el cliente.



III.V. CAUDALÍMETRO DE TURBINA



FT-210 Series – TurboFlow® Low Flow Turbine Sensor

- ▶ Low Flow Rates .1 to 2.5 LPM and High Accuracy $\pm 3\%$ of Reading
- ▶ Lightweight Turbine Ensures Fast Startup
- ▶ Mounts In Any Orientation

Gems FT-210 features proven turbine technology in a small package for low flow applications. The turbine technology provides a highly repeatable sensor ideally suited for measurement of either volume dispensing and/or flow rate applications. The small turbine reacts quickly to on/off dispensing applications. Each sensor is 100% tested, ensuring years of service life.

Specifications

Wetted Materials	
Body	Nylon 12 (Grilamid TR55) or Grivory
Turbine	Nylon 12 Composite
Bearings	PTFE/15% Graphite
Operating Pressure	350 PSI (24 bar)
Burst Pressure	1400 PSI (97 bar)
Flow Range	.026-.65 gallons/minute 0.1-2.5 liters/minute 3.4-84.5 ounces/minute
Pulses	83,200 per gallon 22,000 per liter 650 per ounce
Frequency Output	36.6-917 Hz
Operating Temperature	-4°F to 212°F (-20°C to 100°C)
Viscosity	32 to 70 SSU (.8 to 16 Centistokes)
Filter	<50 Microns
Input Power	5 to 24 VDC
Output (Hz)	NPN Sinking Open Collector @ 20mA Maximum Leakage Current 10 μ A (3K-30K Pull up resistor required)
Accuracy	$\pm 3\%$ of Reading
Repeatability	0.5% of Full Scale
Electrical Connection	9.4mm Spacing 3-pole DIN Connector (1" high)
Inlet/Outlet Ports	1/4" NPT (1/4" G Male also available)

How To Order

Specify a Part Number for the Port Connection AND a Part Number for the DIN Electrical Connection. Two Part Numbers are required for a complete part assembly.

FT-210 Sensor

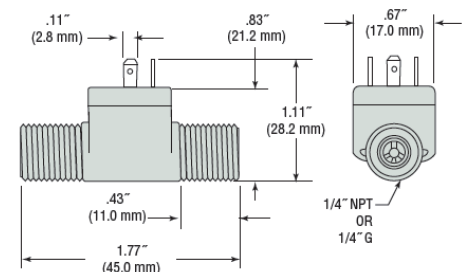
Body Material	Port Size	Part Number
Nylon 12	1/4" NPT	212465
	1/4" G	212460
Grivory®	1/4" NPT	223910
	1/4" G	223190

Electrical Connection

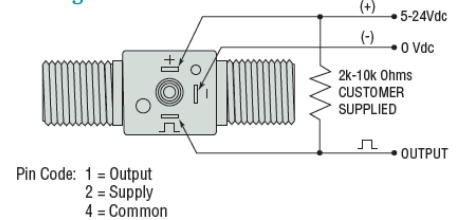
Description	Part Number
1 meter DIN PVC Cable Assembly with 10K pull-up resistor	218572
Mating DIN Connector	212404



Dimensions



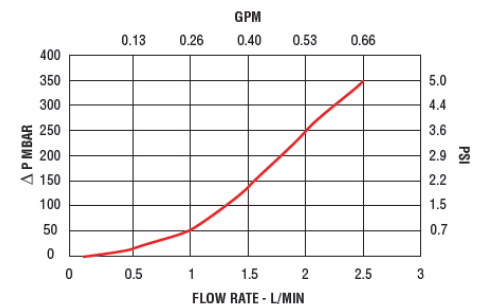
Wiring



For Mating DIN Co 212404

Function	DIN Termination
V+	1
-	⊕
Output	2

Pressure Drop—Typical



III.VI. VÁLVULAS DE MICRORREGULACIÓN

2300 Series

Bar Stock Metering Valves



Typical Applications

- Metering liquids and gases on analytical equipment
- laboratory sampling
- Gas chromatography, analyzers
- Flow meters and gauges

Technical Data

BODY*	316 stainless steel, brass
MAXIMUM OPERATING PRESSURE	<i>Brass</i> <ul style="list-style-type: none"> • 3000 psig up to 200° F (207 bar @ 93° C) <i>316 stainless steel</i> <ul style="list-style-type: none"> • 3000 psig 100° F (207 bar @ 38° C) • 1000 psig 250° F (68.9 bar @ 121° C)
OPERATING TEMPERATURE RANGE	<i>Buna N O-ring Packing</i> <ul style="list-style-type: none"> • -40° to 200° F (-40° to 93° C) <i>Teflon® Packing</i> <ul style="list-style-type: none"> • -60° to 250° F (-51° to 121° C)
ORIFICE	.062", .125" (1.59 mm, 3.17 mm)
CV FACTOR**	1° stem, 0.062" orifice: 0.012 8° stem, 0.062" orifice: 0.086 8° stem, 0.125" orifice: 0.30

* consult factory for other materials

** Cv factors shown are based on flow through entire metering range, approximately 20 handle turns

Features & Benefits

- Micrometer vernier handle provides visual control and precise establishment of flow settings. To order, specify 2300K1 following the valve number.
- 20 turn stem displacement for fine metering
- 2 orifice sizes 0.062" (1.59mm) and 0.125" (3.17mm) are available with standard 8° stem
- Spring loaded stem in all 316 stainless steel valves prevents galling and enlargement of the orifice.
- For ultra fine metering, a 1° spring loaded stem design is available for all valves with 0.062" (1.59mm) orifice. See flow curves for details.
- Panel mounting is standard on all valves
- Bonnet lock prevents accidental disengagement of bonnet.
- Special High Tolerance NPT Thread

HOKE Incorporated

405 Centura Court • PO Box 4866 • Spartanburg, SC 29303
 Phone (864) 574-7966 Fax (864) 587-5608
www.hoke.com • sales@hoke.com



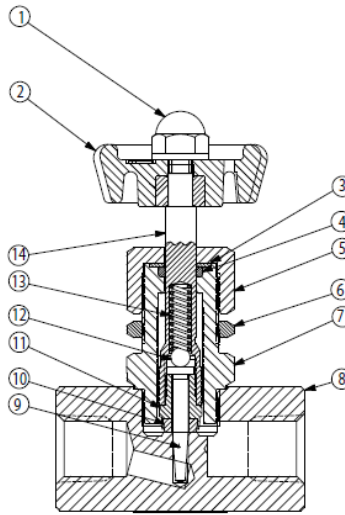
2300 Series

Materials of Construction

316 Stainless Steel Valves (Teflon® Packing)

	DESCRIPTION	MATERIAL
1	CAP NUT (10-24)	Zinc Alloy
2	HAND WHEEL*	Nylon
3	WASHER	Teflon®
4	PACKING	Teflon®
5	PACKING NUT	316 stainless
6	MOUNTING NUT	316 stainless
7	HOUSING	316 stainless
8	BODY	316 stainless
9	SPINDLE POINT	316 stainless
10	SEAT	PCTFE
11	SEAT HOLDER	316 stainless
12	BALL	316 stainless
13	COMPRESSION SPRING	316 stainless
14	STEM	316 stainless

* Optional micrometer handle - Aluminum

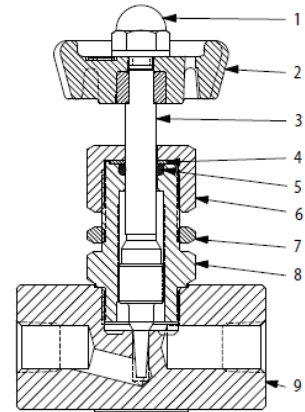


2335F[JY] / 2315F[JY]
stainless steel

Brass Valves (Buna-N Packing)

	DESCRIPTION	MATERIAL
1	CAP NUT (10-24)	Zinc Alloy
2	HAND WHEEL*	Nylon
3	STEM	316 stainless
4	WASHER	Nylon
5	O-RING	Nylon
6	PACKING NUT	Brass
7	MOUNTING NUT	FCB
8	HOUSING	Brass
9	BODY	Brass

* Optional micrometer handle - Aluminum

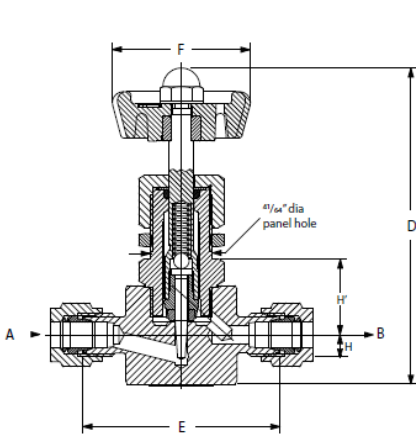


2331F[J]B
Brass

Dimensions

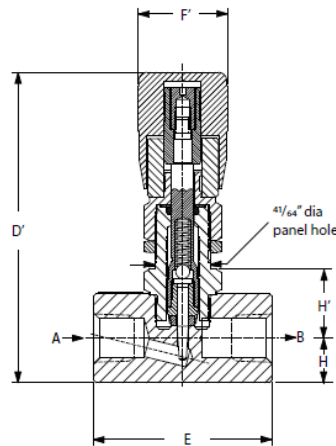
FLOW PATTERN	A & B CONNECTIONS								PANEL MOUNTING DIMENSIONS		
			D	D'	E	F	F'	H	H'	PANEL THICKNESS	HOLE SIZE
GLOBE	¼" NPT FEMALE	inch	3.59	3.88	2	1.41	1	0.5	0.75	0.13	0.64
		mm	91	98	51	36	25	12.7	19	3	16
	½" NPT FEMALE	inch	3.59	3.88	2	1.41	1	0.5	0.75	0.13	0.64
		mm	91	98	51	36	25	12.7	19	3	16
	¼" GYROLOK®	inch	3.59	3.88	2.63	1.41	1	0.5	0.75	0.13	0.64
		mm	91	98	67	36	25	12.7	19	3	16
ANGLE	¼" NPT FEMALE	inch	3.75	4.06	1.44	1.41	1	0.56	0.81	0.13	0.64
		mm	95	103	37	36	25	14	21	3	16
	½" NPT FEMALE	inch	3.75	4.06	1.44	1.41	1	0.56	0.81	0.13	0.64
		mm	95	103	37	36	25	14	21	3	16

Dimensions for reference only, subject to change.



2335G[JY] / 2315G[JY]
316 stainless steel

8 HOKE Metering Valves

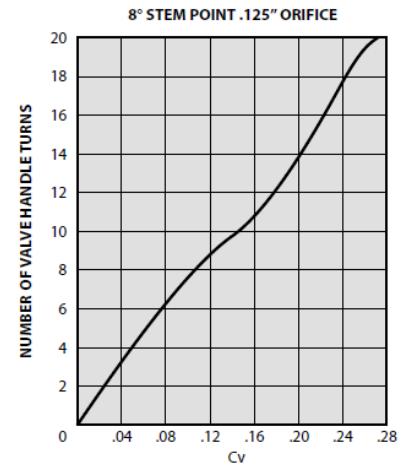
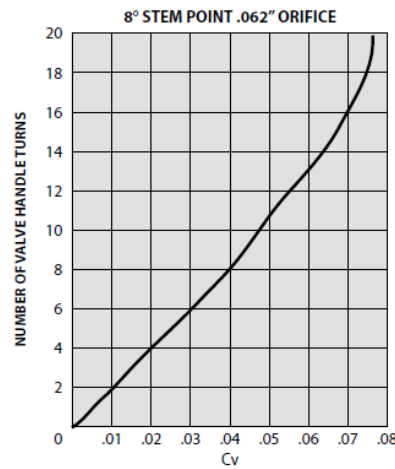
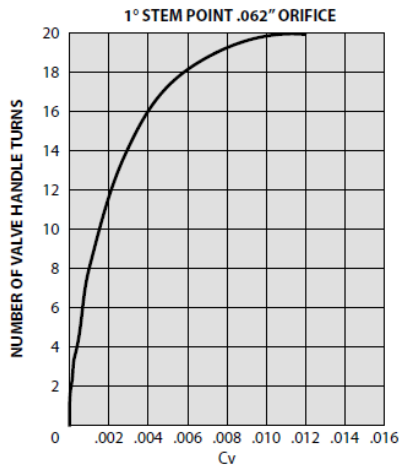


2335F4Y / 2315F4Y
316 stainless steel
(with optional micrometer handle)



2300 Series

Curves



How to Order

FLOW PATTERN	CONNECTIONS	316 STAINLESS STEEL VALVES			BRASS VALVES	
		TEFLON® PACKING			BUNA-N O-RING PACKING	
		1" STEM SPRING LOADED	8" STEM SPRING LOADED	8" STEM SPRING LOADED	SOLID 8" STEM	SOLID 8" STEM
		.062" ORIFICE	.062" ORIFICE	.125" ORIFICE	.062" ORIFICE	.125" ORIFICE
GLOBE	1/8" NPT FEMALE	2355F2Y	2315F2Y	2335F2Y	2311F2B	2331F2B
	1/4" NPT FEMALE	2355F4Y	2315F4Y	2335F4Y	2311F4B	2331F4B
	1/4" GYROLOK®	2355G4Y	2315G4Y	2335G4Y	—	2331G4B
ANGLE	1/8" NPT FEMALE	—	—	—	2321F2B	2341F2B
	1/4" NPT FEMALE	—	—	—	2321F4B	2341F4B

FOR YOUR SAFETY

IT IS SOLELY THE RESPONSIBILITY OF THE SYSTEM DESIGNER AND USER TO SELECT PRODUCTS SUITABLE FOR THEIR SPECIFIC APPLICATION REQUIREMENTS AND TO ENSURE PROPER INSTALLATION, OPERATION AND MAINTENANCE OF THESE PRODUCTS. MATERIAL COMPATIBILITY, PRODUCT RATINGS AND APPLICATION DETAILS SHOULD BE CONSIDERED IN THE SELECTION. IMPROPER SELECTION OR USE OF PRODUCTS DESCRIBED HEREIN CAN CAUSE PERSONAL INJURY OR PROPERTY DAMAGE.

Ordering Options

Spare Parts

Spare parts and repair kits are available for all needle valves. Please contact your distributor for specific information.

Cleaning and Testing

When ordering, please specify if oxygen cleaning or helium leak testing is required.

Additional Sizes

Additional sizes and options are available on special request. Please consult your local HOKE distributor.



III.VII. PID

Especificaciones

Voltaje de línea/Energía (Valores mínimos/máximos)

- 85 a 264 V~ (CA), 47 a 63 Hz
- 20 a 28 V~ (CA), 47 a 63 Hz
- 12 a 40 V= (cc)
- 14 VA de consumo máximo de energía (PM8 y 9)
- consumo de energía máximo de 10 VA (PM6)
- Retención de datos mediante memoria no volátil en caso de interrupción del servicio eléctrico
- Conforme con el estándar SEMIF47-0200, Figura R1 -1 requisitos de caída de voltaje a 24 V ~ (CA) o superior

Ambiente

- temperatura de funcionamiento: 0 a 149 °F (-18 a 65 °C)
- temperatura de almacenamiento: -40 a 185 °F (-40 a 85 °C)
- 0 a 90% de humedad relativa, sin condensación

Exactitud

- Exactitud de calibración y conformidad del sensor: $\pm 0.1\%$ de desviación, ± 1 °C a temperatura ambiente calibrada y línea de voltaje nominal
- Tipos R, S, B; 0.2%
- Tipo T por debajo de -50 °C; 0.2%
- Temperatura ambiente de calibración a 77 ± 5 °F (25 ± 3 °C)
- Rango de exactitud: 1000 °F (540 °C) mín.
- Estabilidad de la temperatura: ± 0.1 °F/°F (± 0.1 °C/°C) de aumento en la temperatura ambiente máx.

Certificaciones de organismos reguladores

- Homologado por UL® incluido UL 61010-1 Archivo E185611
- Revisado por UL para cumplir con el código canadiense C22.2 N.º 61010-1-04
- Homologado por UL para uso en interiores NEMA Tipo 4X 50, sellado de panel frontal con protección IP66
- Interruptor de límite para temperatura FM clase 3545 Archivo 3029084
- Conformidad CE: vea la Declaración de conformidad RoHS y conformidad con W.E.E.E.
- Cumple con las normas de ODVA-EtherNet/IP™ y DeviceNet
- Homologado por UL para ANSI/ISA 12.12.01-2007 Archivo E184390
- Este equipo es adecuado para utilizar sólo en ubicaciones Clase 1, Div.2, Grupo A, B, C y D o no peligrosas. Código de temperatura T4A
- Revisado por UL conforme al código canadiense CSA C22.2 N.º 213-M1987 para uso en ubicaciones peligrosas
- PM6 conforme al código canadiense CSA C22.2 N.º 24 Archivo 158031 Clase 4813-02, para DIN de 1/16

Controlador

- El usuario puede seleccionarlo para calor/frío como on-off (encendido-apagado), P, PI, PD, PID o acción de alarma, no válidos para controladores de límite
- Autoajuste con algoritmo de control adaptativo TRU-TUNE®+
- Control de velocidad de muestreo: entrada = 10 Hz, salidas = 10 Hz

Perfil de variación gradual/constante - Reloj en tiempo real y respaldo de baterías

- Exactitud (normal): ± 30 PPM a 77 °F (25 °C)
- ± 30 -100 PPM a -4 a 149 °F (-20 a 65 °C)
- Tipo de batería: litio (reciclar correctamente)
- Duración normal de la batería: tres años consecutivos de vida sin energía 77 °F (25 °C)

Comunicaciones en serie aisladas

- Comunicaciones ELA232/485, Modbus® RTU
- EtherNet/IP™, DeviceNet™ (certificado por ODVA)
- Modbus® TCP
- Profibus DP

Terminación de cableado: terminales Touch Safe

- Los terminales de entrada, energía y salida de control son desmontables 12 a 22 AWG

Entrada universal

- Termopar, sensores con o sin conexión a tierra
- >20 M Ω de impedancia de entrada
- 3 μ A de detección de sensor abierto
- 2 K Ω de resistencia máxima en la fuente
- RTD de 2 ó 3 cables, de platino, 100 Ω y 1000 Ω a 0 °C, calibración a la curva DIN (0.00385 Ω /°C)
- Proceso, 0-20 mA a 100 Ω , ó 0-10 V = (CC) a 20 k Ω impedancia de entrada; escalable, 0-50 mV, 0-1000 Ω
- Potenciómetro: 0 a 1,200 Ω
- Incrustación inversa

Tipo de entrada	Error máx. a 25 °C	Rango bajo de exactitud	Rango alto de exactitud	Unidades
J	± 1.75	0	750	°C
K	± 2.45	-200	1250	°C
T (0 a 350)	± 1.55	0	350	°C
T (-200 a 0)	± 1.55	-200	0	°C
N	± 2.25	0	1250	°C
E	± 2.10	-200	900	°C
R	± 3.9	0	1450	°C
S	± 3.9	0	1450	°C
B	± 2.66	870	1700	°C
C	± 3.32	0	2315	°C
D	± 3.32	0	2315	°C
F (PT100)	± 2.34	0	1343	°C
RTD, 100 ohm	± 2.00	-200	800	°C
RTD, 1000 ohm	± 2.00	-200	800	°C
mV	± 0.05	0	50	mV
Voltios	± 0.01	0	10	Voltios
mAcc	± 0.02	0	20	mAmps CC
mAca	± 5	-50	50	mAmps CA
Potenciómetro, rango de 1 K	± 1	0	1000	Ohmios

Rango de operación		
Tipo de entrada	Extremo inferior de rango	Extremo superior de rango
J	-210	1200
K	-270	1371
T	-270	400
N	-270	1300
E	-270	1000
R	-50	1767
S	-50	1767
B	-50	1816
C	0	2315
D	0	2315
F (PT100)	0	1343
RTD (100 ohm)	-200	800
RTD (1000 ohm)	-200	800
Voltios	0	10
mAcc	0	20



Rango de operación (cont.)		
mAca	-50	50
Potenciómetro, rango de 1 K	0	1200
Resistencia, rango de 5 K	0	5000
Resistencia, rango de 10 K	0	10000
Resistencia, rango de 20 K	0	20000
Resistencia, rango de 40 K	0	40000

Entrada de termistor				
Tipo de entrada	Error máx. a 25 °C	Extremo inferior de rango de exactitud	Extremo superior de rango de exactitud	Unidades
Termistor, rango de 5 K	±5	0	5000	Ohmios
Termistor, rango de 10 K	±10	0	10000	Ohmios
Termistor, rango de 20 K	±20	0	20000	Ohmios
Termistor, rango de 40 K	±40	0	40000	Ohmios

- 0 a 40 KΩ, 0 a 20 KΩ, 0 a 10 KΩ, 0 a 5 KΩ
- 2.252 KΩ y 10 KΩ base en 77 °F (25 °C)
- Curvas de linealización incorporadas
- Requisitos de compatibilidad de termistor de terceros

Base R a 25 °C	Técnicas Alfa	Beta THERM	YSI	Indicador
2.252 K	Curva A	2.2K3A	004	A
10 K	Curva A	10K3A	016	B
10 K	Curva C	10K4A	006	C

Medida Corriente

- Acepta señales de 0-50 mA (rango programable por el usuario)
- El rango de operación visualizado y la resolución puede determinarse y son programables por el usuario.
- Requiere un transformador de corriente opcional.

2 opciones de Entrada/Salida digitales - 2 DIO

- Velocidad de actualización de entrada digital 10 Hz
 - Voltaje CC
 - Entrada máx. 36 V a 3 mA
 - Estado elevado mínimo 3 V a 0.25 mA
 - Estado inferior máximo 2 V
 - Contacto seco
 - Resistencia abierta mínima 10 KΩ
 - Resistencia cerrada máxima 50 Ω
 - Cortocircuito máximo 20 mA
- Velocidad de actualización de salida digital 10 Hz
 - Voltaje de salida 24 V, límite de corriente, salida 6 = 10 mA máx., salida 5 = DIN-A-MITE tripolar® o 24 mA máx.

6 opciones de Entrada/Salida digitales - 6 DIO

- Entrada o salida digital
- Valor de actualización 10 Hz
- CC conmutada
 - Voltaje de salida 12 a 24 V= (CC), el controlador ajusta automáticamente según el consumo de corriente.

- Fuente de corriente de alimentación máx. 40 mA a 20 V= (CC) y 80 mA a 12 V= (CC)
- Estado bajo máx. 2 V
- Colector abierto
 - El voltaje conmutado máx. es 32 V= (CC)
 - La corriente conmutada máx. por salida es 1.5 A
 - La corriente conmutada máx. para las 6 salidas es 8 A

Hardware de salida

- CC conmutada = 22 a 32 V= (CC) a salida 1 y 3 de 30 mA, 10 mA para salida 2 y 4
- CC conmutada/colector abierto = 30 V= (CC) máx. a disipador de corriente máx. a 100 mA
- Relé de estado sólido (SSR), forma A, 0.5 A a 24 V~ (CA) mín., 264 V ~ (CA) máx., con aislamiento óptico, sin supresión de contacto, 20 VA 120/240 V~ (CA) servicio piloto
- Relé electromecánico, Forma C, 5 A, 24 a 240 V~ (CA) o 30 V= (CC) máx. carga resistiva, 100 000 ciclos en cargas especificadas, 125 VA servicio piloto a 120/240 V~ (CA), 25 VA a 24 V~ (CA)
- Relé electromecánico, Forma A, 5 A, 24 a 240 V~ (CA) o 30 V= (CC) máx. carga resistiva, 100 000 ciclos en cargas especificadas, 125 VA servicio piloto a 120/240 V~ (CA), 25 VA a 24 V~ (CA)
- Relé SIN ARCO, forma A, 15 A, 24 a 240 V~ (CA), no V= (CC), carga resistiva, 2 millones de ciclos en carga especificada
- Proceso/retransmisión universal, rango de salida seleccionable:
 - 0 a 10 V = (CC) en una carga mín. de 1000 Ω
 - 0 a 20 mA en carga máx. de 800 Ω

Interfase del operador

- Pantallas LED de 7 segmentos, dobles de 4 dígitos
- Teclas avanzar, infinito, arriba y abajo, más teclas EZ programables opcionales dependiendo del tamaño del modelo
- Pantalla normal de velocidad de actualización 1 Hz
- Tecla RESETABLECER sustituida por infinito sobre todos los modelos que incluyen el control del límite

Dimensiones				
Tamaño	Detrás del tablero (máx.)	Ancho	Altura	Altura de caracter en la pantalla
1/4	100.8 mm (3.97 pulgs.)	100.3 mm (3.95 pulgs.)	100.3 mm (3.95 pulgs.)	alta: 11.43 mm (0.450 pulgs.) medio: 9.53 mm (0.375 pulgs.) baja: 7.62 mm (0.300 pulgs.)
1/16	101.6 mm (4.00 pulgs.)	53.3 mm (2.10 pulgs.)	53.3 mm (2.10 pulgs.)	alta: 10.80 mm (0.425 pulgs.) baja: 6.98 mm (0.275 pulgs.)
1/8 (H)	101.6 mm (4.00 pulgs.)	100.3 mm (2.10 pulgs.)	53.9 mm (1.22 pulgs.)	superior: 11.4 mm (0.450 pulgs.) medio: 9.53 mm (0.375 pulgs.) inferior: 7.62 mm (0.300 pulgs.)
1/8 (V)	101.6 mm (4.00 pulgs.)	53.3 mm (2.10 pulgs.)	100.3 mm (3.95 pulgs.)	superior: 11.4 mm (0.450 pulgs.) medio: 9.53 mm (0.375 pulgs.) inferior: 7.62 mm (0.300 pulgs.)

Peso	
DIN de 1/4 (PM4)	DIN de 1/8 (PM8&9)
• Controlador: 331 g (11.7 oz)	• Controlador: 284 g (10 oz)
DIN de 1/16 (PM6)	Manual del usuario
• Controlador: 186 g (6.6 oz)	• Manual del usuario: 284.86 g (10.1 oz)

Modbus® es una marca comercial de AEG Schneider Automation Inc. EtherNet/IP™ es una marca comercial de ControlNet International Ltd. utilizada bajo licencia por Open DeviceNet Vendor Association, Inc. (ODVA).

UL® es una marca registrada de Underwriters Laboratories, Inc.

DeviceNet™ es una marca comercial de Open DeviceNet Vendors Association.

Nota:

Estas especificaciones están sujetas a cambio sin previo aviso.



IV. ADQUISICIÓN DE DATOS

IV.I. AGILENT

34980A system specifications and characteristics

DMM accuracy \pm (% of reading + % of range)

Includes measurement error, switching error, and transducer conversion error

Function	Range ^[1]	Frequency, etc.	Measurement including switch error ^[11]			
			24 hour ^[2] Tcal \pm 1°C	90 days Tcal \pm 5°C	1 year Tcal \pm 5°C	Temperature coefficient/°C >Tcal \pm 5°C
DC voltage (with 34921A/22A/ 31A/32A) ^[10]	100.0000 mV		0.0030 + 0.0035	0.0040 + 0.0040	0.0050 + 0.0040	0.0005 + 0.0005
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
	10.00000 V		0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
	100.0000 V		0.003 + 0.0006	0.0045 + 0.0006	0.0055 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
	300.0000 V		0.003 + 0.0020	0.0045 + 0.0030	0.0055 + 0.0030	0.0005 + 0.0003
True RMS AC voltage ^[3]	All ranges from 100.0000 mV to 100.0000 V	3 Hz-5 Hz	1.00 + 0.03	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	0.100 + 0.004
		5 Hz-10 Hz	0.35 + 0.03	0.35 + 0.04	0.35 + 0.04	0.035 + 0.004
		10 Hz-20 kHz	0.04 + 0.03	0.05 + 0.04	0.06 + 0.04	0.005 + 0.004
		20 kHz-50 kHz	0.10 + 0.05	0.11 + 0.05	0.12 + 0.05	0.011 + 0.005
		50 kHz-100 kHz	0.55 + 0.08	0.60 + 0.08	0.60 + 0.08	0.060 + 0.008
	300.0000 V	100 kHz-300 kHz ^[4]	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	0.20 + 0.02
		3 Hz-5 Hz	1.00 + 0.05	1.00 + 0.08	1.00 + 0.08	0.100 + 0.008
		5 Hz-10 Hz	0.35 + 0.05	0.35 + 0.08	0.35 + 0.08	0.035 + 0.008
		10 Hz-20 kHz	0.04 + 0.05	0.05 + 0.08	0.06 + 0.08	0.005 + 0.008
		20 kHz-50 kHz	0.10 + 0.10	0.11 + 0.12	0.12 + 0.12	0.011 + 0.012
		50 kHz-100 kHz	0.55 + 0.20	0.60 + 0.20	0.60 + 0.20	0.060 + 0.020
		100 kHz-300 kHz ^[5]	4.00 + 1.25	4.00 + 1.25	4.00 + 1.25	0.20 + 0.05
Resistance ^[7]	100.0000 Ω	1 mA	0.0030 + 0.0035	0.008 + 0.004	0.010 + 0.004	0.0006 + 0.0005
	1.000000 k Ω	1 mA	0.0020 + 0.0006	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	10.00000 k Ω	100 μ A	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	100.0000 k Ω	10 μ A	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	
	1.000000 M Ω	5.0 μ A	0.002 + 0.001	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0010 + 0.0002
	10.00000 M Ω	500 nA	0.015 + 0.001	0.020 + 0.001	0.040 + 0.001	0.0030 + 0.0004
	100.0000 M Ω	500 nA/10 M Ω	0.300 + 0.010	0.800 + 0.010	0.800 + 0.010	0.1500 + 0.0002
Frequency and period ^[6]	100 mV to 300 V	3 Hz-5 Hz	0.10	0.10	0.10	0.005
		5 Hz-10 Hz	0.05	0.05	0.05	0.005
		10 Hz-40 Hz	0.03	0.03	0.03	0.001
		40 Hz-300 kHz	0.006	0.01	0.01	0.001
DC current (34921 only)	10.00000 mA	< 0.1 V burden typ.	0.005 + 0.010	0.030 + 0.020	0.050 + 0.020	0.002 + 0.0020
	100.0000 mA	< 0.6 V	0.010 + 0.004	0.030 + 0.005	0.050 + 0.005	0.002 + 0.0005
	1.000000 A	< 2 V	0.050 + 0.006	0.080 + 0.010	0.100 + 0.010	0.005 + 0.0010
True RMS AC current (34921A only)	10.00000 mA	3 Hz-5 Hz	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	0.100 + 0.006
	and ^[3]	5 Hz-10 Hz	0.30 + 0.04	0.30 + 0.04	0.30 + 0.04	0.035 + 0.006
		10 Hz-5 kHz	0.10 + 0.04	0.10 + 0.04	0.10 + 0.04	0.015 + 0.006
	1.0 A	3 Hz-5 Hz	1.00 + 0.5	1.00 + 0.5	1.00 + 0.5	0.100 + 0.006
	100.0000 mA ^[8]	5 Hz-10 Hz	0.30 + 0.5	0.30 + 0.5	0.30 + 0.5	0.035 + 0.006
		10 Hz-5 kHz	0.10 + 0.5	0.10 + 0.5	0.10 + 0.5	0.015 + 0.006

[1] One hour warm-up and a fixed configuration with slow AC filter, sine wave input, and 6 ½ digits. Temperature within \pm 5°C of temperature at calibration (Tcal between 18-28°C)

[2] 90 minute warm-up and a fixed configuration and 6 ½ digits. Temperature within \pm 1°C of temperature at calibration (Tcal between 18-28°C)

[3] Relative to calibration standards

[4] 20% over range on all ranges except 300VDC and AC ranges and 1 ADC and AC current ranges

[5] For sine wave input > 5% of range; for inputs from 1% to 5% of range and < 50 kHz add 0.1% of range additional error; for AC filter slow

[6] Typically 30% of reading error at 1 MHz, limited to 1×10^6 volt-hertz

[7] Accuracy for 4-wire ohms. Add 4 ohms uncertainty (typ) for 2-wire ohms function due to conductor and contact resistance variability in the DMM. The 2-wire resistance accuracy can be improved by measuring a short on each channel and using the built-in $y = Mx + b$ scaling function. See User Guide, Chapter 3. The series resistance of the 34923/24/25/33/34 limits the use of the

100 ohms resistance range. Agilent recommends the use of 4-wire ohms for resistance measurements. For high accuracy voltage measurements, select the DMM input resistance setting of > 10 G ohms to minimize the impact of relay contact resistance.

[8] For inputs >100mV; for inputs 10mV to 100mV multiply % of reading error X 10; for 1 sec aperture (6 ½ digits)

[9] Specified only for inputs > 10 mA. For AC filter slow

[10] Add 50 μ V error for 34923A/24A/33A and 7 μ V error for the 34925A

[11] Voltage measurements using Fixed-Z input impedance for the 100 V and 300 V ranges.



Additional Low Frequency Error for ACV, ACI (% of reading)

Frequency	AC Filter Slow	AC Filter Medium	AC Filter Fast
10 Hz - 20 Hz	0	0.74	—
20 Hz - 40 Hz	0	0.22	—
40 Hz - 100 Hz	0	0.06	0.73
100 Hz - 200 Hz	0	0.01	0.22
200 Hz - 1 kHz	0	0	0.18
> 1 kHz	0	0	0

Additional Error for Frequency, Period (% of reading)

Frequency	Aperture (Digits)		
	1 second (6 1/2 digits)	0.1 seconds (5 1/2 digits)	0.01 seconds (4 1/2 digits)
3 Hz - 5 Hz	0	0.12	0.12
5 Hz - 10 Hz	0	0.17	0.17
10 Hz - 40 Hz	0	0.2	0.2
40 Hz - 100 Hz	0	0.06	0.21
100 Hz - 300 Hz	0	0.03	0.21
300 Hz - 1 kHz	0	0.01	0.07
> 1 kHz	0	0	0.02

Temperature measurement accuracy

Temperature 1-year accuracy	Type	Best range [1]	Extended range [1]	Temperature coefficient/°C
Thermocouple (34921A only, includes cold junction accuracy on terminal block)	B	1100°C to 1820°C	1.2°C	400°C to 1100°C
	E	-150°C to 1000°C	1.0°C	-200°C to -150°C
	J	-150°C to 1200°C	1.0°C	-210°C to -150°C
	K	-100°C to 1200°C	1.0°C	-200°C to -100°C
	N	-100°C to 1300°C	1.0°C	-200°C to -100°C
	R	300°C to 1760°C	1.2°C	-50°C to 300°C
	S	400°C to 1760°C	1.2°C	-50°C to 400°C
RTD	T	-100°C to 400°C	1.0°C	-200°C to -100°C
	R _i from 49 Ω to 2.1 K Ω	-200°C to 600°C	0.06°C	0.003°C
Thermistor	2.2 k, 5 k, 10 k	-80°C to 150°C	0.08°C	0.002°C

[1] For total measurement accuracy, add temperature probe error; for <1°C accuracy, an external fixed reference is required

Typical system speeds (Measurements made on a 3.2GHz PC running VB6 in Windows XP Pro)

Single Channel Reading times in msec		Direct measurements – direct to I/O (includes switch, measure time and I/O time)		Direct measurement to memory (GPIO)
Single channel [1] [2]	GPIO msec	USB 2.0 msec	LAN (w/ VXI 11) msec	Measurement into memory msec
Single channel, DCV	2.83	3.14	4.57	1.90
Single channel, ACV	5.00	5.35	5.75	4.00
Single channel, ohms	2.91	3.14	4.65	1.90
Single channel while changing scale (eg MEAS DCV 10 / MEAS DCV 1)	9.52	10.64	11.76	8.40
Single channel while changing function (eg. MEAS ACV / MEAS DCV)	128	120	120	120
Command execution time [3]				
34925A	Open or Close	0.7	0.9	1.6
	Read?	2.9	3.3	4.7
	Close/Read/Open	4.8	5.3	6.5
	Init/*WAI	1.9	2.1	3
	Close/Init/Open	3.7	4.1	4.7
34923A	Open or Close	0.9	1.2	1.8
	Read?	2.9	3.3	4.7
	Close/Read/Open	5.3	5.8	6.5
	Init/*WAI	1.9	2.1	3
	Close/Init/Open	4.2	4.7	5.2
34921A	Open or Close	4.7	5	5.3
	Read?	2.9	3.3	4.7
	Close/Read/Open	14	15	15
	Init/*WAI	1.9	2.1	3
	Close/Init/Open	12.4	14	14
34934A	Close	1.8	2.2	3.1
	Read?	2.8	3.1	4.8
	Open	1.5	1.8	3.2

[1] Readings were made with minimum NPLC, delay 0, display off, autozero off

[2] All times include the issue of "READ?" and the retrieval of data

[3] CLOSE or OPEN bus transfer times allowed to overlap previous command; command parse times overlap current activity until IO latency dominant



34934A Multi-channel close speeds over GPIB (msec)

	Isolate or fixed mode	Auto 100 mode	Auto 0 mode
Close 2 channels	0.97	1.22	1.31
Close 5 channels	0.43	0.54	0.56
Close 10 channels	0.22	0.28	0.29
Close 60 channels	0.13	0.17	0.21

Single channel measurement rates—DMM reading rates ^[1] ^[2]

Function	Resolution	Rds/s
DCV	4 ½ digits (0.02 plc)	3000
	5 ½ digits (1 plc)	59
	6 ½ digits (10 plc)	6
2-wire resistance	4 ½ digits (0.02 plc)	2000
	5 ½ digits (1 plc)	58
	6 ½ digits (10 plc)	6
Thermocouple	(0.02 plc)	2000
	0.1°C (1 plc)	59
RTD/Thermistor	1°C (0.02 plc)	1900
	0.1°C (1 plc)	58
	0.01°C (10 plc)	6
ACV	6 ½ fast (200 Hz)	350
	6 ½ Med (20 Hz)	350
	6 ½ slow (3 Hz)	300
Frequency, period	4 ½ digits (10 ms)	70
	5 ½ digits (100 ms)	9
	6 ½ digits (1 s gate)	1

[1] Reading speeds for 60Hz; autozero OFF

[2] For fixed function and range, readings to memory, scaling and alarms off, autozero OFF

Scanning measurement rates to bus or memory

Scanning channels ^[1]	Direct measurements – direct to I/O (includes switch, measure time and I/O time)			Measurement into memory
	GPIB ch/sec	USB 2.0 ch/sec	LAN (w/ VXI 11) ch/sec	Into memory ch/sec
Scanning DCV or 2-wire ohms				
34925A	920	860	980	1000
34923A/24A	588	572	605	625
34921A/22A	109	109	109	109
Scanning ACV ^[2]				
34925A	318	315	323	318
34923A/24A	260	260	260	260
34921A/22A	88	88	88	88
Scanning temperature				
34921A	109	109	109	109
Scanning digital in				
34950A	660	592	815	1038

[1] Speeds are for 4 1/2 digits, delay 0, display off, autozero off and scanning is within bank on the same module; add 10ms for between banks or modules for 2-wire measurements; 4-wire measurements are slower

[2] Add additional time for filter setting on ACV

Data out of memory to LAN, USB, or GPIB (data transfer rate with 1000 channel blocks)

	GPIB rds/sec	USB 2.0 rds/sec	LAN (w/ VXI 11) ^[1] rds/sec
Readings	2560	2400	3542
readings with timestamp	1304	1230	1826
readings with all format options ON	980	926	1361

[1] LAN large block throughput rate is increased by approximately 30% using LAN sockets



Measurement characteristics with optional internal DMM *continued*

DC operating characteristics ⁽¹⁾

Function	Digits ⁽⁵⁾	Readings/s	Additional RMS noise error
DCV ⁽⁷⁾ , DCI, and Resistance (≤ 10 k Ω)	6½	0.6 (0.5)	0% of range
	6½	6 (5)	0% of range
	5½	60 (50)	0.001% of range
	5½	300	0.001% of range ⁽⁸⁾
	4½	600	0.01% of range ⁽⁸⁾
	4½	3000	0.1% of range ⁽⁸⁾

Autozero OFF operation

Following instrument warm-up at calibration temperature $\pm 1^\circ\text{C}$ and <10 minutes, add 0.0002% range additional error +5 μV . (For 300 VDC, instead of .0002% of range, need .00066% of range)

Settling considerations

Reading settling times are affected by source impedance, low dielectric absorption characteristics, and input signal changes.

AC operating characteristics ⁽¹⁾

Function	Digits ⁽¹⁾	Readings/s	AC filter
ACV, ACI:	6½	7 sec/reading	Slow (3 Hz)
	6½	1	Medium (20 Hz)
	6½	8 ⁽¹⁰⁾	Fast (200 Hz)
	6½	100 ⁽¹¹⁾	Fast (200 Hz)

[4] Reading speeds for 60 Hz and (50 Hz) operation; autozero OFF

[5] 6½ digits = 22 bits; 5½ digits = 18 bits; 4½ digits = 15 bits

[6] Add 20 μV for DCV, 4 μA for DCI, or 20 m Ω for resistance

[7] For 300 VDC, multiply the additional noise error by 3.3

[8] Maximum reading rates for 0.01% of AC step additional error; additional settling delay required when input DC level varies

[9] 6½ digits = 22 bits; 5½ digits = 18 bits; 4½ digits = 15 bits

[10] For external trigger or remote operation using default settling delay (Delay Auto)

[11] Maximum limit with default settling delays defeated

System specifications

Scanning inputs

Analog:	34921A, 34922A, 34923A, 34924A, and 34925A multiplexer channels
Digital:	34950A/52A digital in and totalize

Scan triggering

Source	Interval, external, button press, software, or on monitor channel alarm
Scan count	1 to 50,000 or continuous
Scan interval	0 to 99 hours; 1ms step size
Channel delay	0 to 60 seconds per channel; 1 ms step size
External trig delay	< 2 ms. With monitor on < 200 ms
External trig jitter	< 2 ms

Alarms

Analog inputs	Hi, Lo, or Hi + Lo evaluated each scan
Digital inputs	34950A/52A digital in maskable pattern match or state change 34950A/52A frequency and totalize: Hi limit only
Monitor channel	Alarm evaluated each reading
Alarm outputs	4 TTL compatible Selectable TTL logic Hi or Lo on fail
Latency	5 ms (typical)

Memory

Type	Volatile
Readings	500,000 with timestamp, readable during scan
States	5 instrument states with user label
Alarm queue	Up to 20 events with channel number, reading, and timestamp

System features

Per-channel math Min/max/average	Individual Mx+B scaling and calculated real time
Power fail recovery	Save switch states
Relay maintenance	Counts each relay closure and stores on module User resettable
Real-time clock	Battery-backed, 20-year typical life



Measurement characteristics with optional internal DMM

DC voltage

Measurement method	Continuously integrating multi-slope III A-D converter
A-D linearity	0.0002% of reading + 0.0001% of range on 10 V range
Input resistance 100 mV, 1 V, 10 V ranges 100 V, 300 V ranges	Selectable 10 M Ω or > 10,000 M Ω 10 M Ω \pm 1%
Input bias current	< 50 pA at 25°C
Input protection	300 V all ranges

True RMS AC voltage

Measurement method	AC coupled True RMS—measures the AC component of the input with up to 300 VDC of bias on any range
Crest factor	Maximum of 5:1 at full scale
Additional crest factor errors (non-sinewave)	Crest factor 1-2 0.05% of reading Crest factor 2-3 0.15% of reading Crest factor 3-4 0.30% of reading Crest factor 4-5 0.40% of reading
AC Filter Bandwidth: Slow Medium Fast	3 Hz - 300 kHz 20 Hz - 300 kHz 200 Hz - 300 kHz
Input impedance	1 M Ω \pm 2% in parallel with 150 pF
Input protection	300 Vrms all ranges

Resistance

Measurement method	Selectable 4-wire or 2-wire ohms
Current source	referenced to LO input
Offset compensation	Selectable on 100 Ω , 1k Ω , 10k Ω ranges
Maximum lead resistance	10% of range per lead for 100 Ω and 1k Ω ranges. 1k Ω on all other ranges
Input protection	300 V on all ranges

Frequency and period

Measurement method	Reciprocal counting technique
Voltage ranges	Same as AC voltage function
Gate time	1 s, 100 ms, or 10 ms
Measurement timeout	Selectable 3 Hz, 20 Hz, 200 Hz LF limit

Measurement Consideration (Frequency and Period)

All frequency counters are susceptible to error when measuring low-voltage, low-frequency signals. Shielding inputs from external noise pickup is critical for minimizing measurement errors.

DC current

Shunt resistance	5 Ω for 10 mA, 100 mA; 0.1 Ω for 1 A
Input protection	1A 250 V fuse on 34921A module

True RMS AC current

Measurement method	Direct coupled to the fuse and shunt. AC coupled True RMS measurement (measures the ac component only)
Shunt resistance	5 Ω for 10 mA; 0.1 Ω for 100 mA, 1 A
Input protection	1A 250 V fuse on 34921A module

Thermocouple

Conversion	ITS-90 software compensation
Reference junction type	Internal, fixed, or external
Open thermocouple check	Selectable per channel. Open > 5 k Ω
Thermistor	44004, 44007, 44006 series
RTD	a = 0.00385 (DIN) and a = 0.00392

Measurement noise rejection 60 (50) Hz ^[1]

DC CMRR	140 dB
AC CMRR	70 dB

Integration time

	Normal mode rejection ^[2]
200 plc/3.33 s (4 s)	105 dB ^[2]
100 plc/1.67 s (2 s)	100 dB ^[2]
20 plc/333 ms (400 ms)	95 dB ^[2]
10 plc/167 ms (200 ms)	90 dB ^[2]
2 plc/33.3 ms (40 ms)	85 dB
1 plc/16.7 ms (20 ms)	60 dB
< 1 plc	0 dB

[1] For 1 K Ω unbalance in LO lead

[2] For power line frequency \pm 0.08%

[3] For power line frequency \pm 1% use 75 dB or \pm 2.5% use 60 dB

continued



General specifications

Power supply	Universal 100 V to 240 V \pm 10%
Power line frequency	50 – 60 Hz \pm 10% automatically sensed
Power consumption	150 VA
Operating environment	Full accuracy for 0 °C to 55 °C Full accuracy to 80% R.H. at 40 °C IEC 60664-1 pollution degree 1
Storage environment	-40°C to 70°C ⁽¹⁾
Mainframe dimensions	133 H x 426 W x 341 D mm (5.25" x 16.8" x 14") Full rack, 3 units high
Mainframe weight	8.8 kg (19.6 lbs)
Module dimensions	280 H x 170 W x 27 D mm (11" x 6.7" x 1")
Module weights	0.73 to 1.18 kg (1.6 to 2.6 lbs)
Terminal block dimensions	28 H x 170 W x 114 D mm (1.1" x 6.7" x 4.5")
Terminal block weights	0.27 to 0.36 kg (0.6 to 0.8 lbs)
Safety conforms to	CSA, UL/IEC/EN 61010-1
EMC conforms to	IEC/EN 61326-1, CISPR 11
Warranty	1 year

Software

Agilent connectivity software included

Agilent IO Libraries Suite 14 or greater (E2094)

Minimum system requirements (IO libraries and drivers)

PC hardware	Intel Pentium 100 MHz, 64 Mbyte RAM, 210 Mbyte disk space Display 800 x 600, 256 colors, CD-Rom drive
Operating system ⁽²⁾	Windows® 98 SE/NT/2000/XP
Computer interfaces	Standard LAN 10BaseT/100BaseTx Standard USB 2.0 IEEE 488.2 GPIB

Software driver support for programming languages

Software drivers:	IVI-C and IVI COM for Windows NT/2000/XP LabVIEW
Compatible with programming tools and environments:	Agilent VEE Pro, Agilent T&M Toolkit (requires Visual Studio.NET) National Instruments Test Stand, Measurement Studio, LabWindows/CVI, LabVIEW, Switch Executive Microsoft Visual Studio.NET, C/C++, Visual Basic 6

Agilent BenchLink data logger software system requirements

Operating system:	Windows 2000 SP4, XP SP 2
Controller:	Recommend Pentium® 4, 800 MHz or greater, Min: Pentium III, 500 MHz
RAM:	Recommend 256 MB or greater, Min 128 MB
Disk Space:	Recommend 200 MB, Min 100 MB
Display:	1024x768 resolution, 256 colors

Agilent BenchLink data logger features

Configuration	Spreadsheet-like channel configurations page. Upload and Download instrument configurations. Computed channels using + - °/, dB, dBm, dBV, x2, x and full, ½, or ¼ bridge strain
Graphical Displays	Real-time and historical data displays Add, delete, size, and configure real time Strip chart with markers and alarm indication, bar and scatter charts, Histogram with statistics, Bar meter, and Data table
Graphical Controls	Sliders, switches, buttons, and LED lights
Alarm / Limit testing	Start/Stop scanning on alarm condition Control 34903A relay state or 34907A digital output on alarm
Data	Real time streamed (saved) to disk Automatically export data and configurations Copy data or graphics to windows clipboard Export your selected data to .CSV, .XML, or TXT formats
Event logging	Automatic entry of alarms and errors

[1] Storage at temperatures above 40 °C will decrease battery life

[2] Load IO Libraries Version M for Windows NT support or version 14.0 for Windows 98 SE support

Definitions for specifications

Specifications describe the warranted performance of calibrated instruments that have been stored for a minimum of 2 hours within the operating temperature range of 0 °C to 50 °C, unless otherwise stated, and after a 45 minute warm-up period. Data represented in this document are specifications unless otherwise noted.

Characteristics describe product performance that is useful in the application of the product, but that is not covered by the product warranty. Characteristics are often referred to as Typical or Nominal values.

- **Typical** describes characteristic performance, which 80% of instruments will meet when operated over a 20 °C to 30 °C temperature range. Typical performance is not warranted.

- **Nominal** describes representative performance that is useful in the application of the product when operated over a 20 °C to 30 °C temperature range. Nominal performance is not warranted.

Note: All graphs contain measured data from several units at room temperature unless otherwise noted.



Tarjetas de conexionado de Agilent

The 34980A mainframe holds up to eight plug-in modules. Mix and match them to create a custom system to meet your switching and system control needs. You can easily add or replace modules as your needs change.

Table 1. 34980A modules at a glance

Module	Description	Max volts	Switch/Carry current	BW (MHz)	Scan ch/sec	Thermal o	Comments
Multiplexer modules							
34921A	40-channel armature multiplexer w/low thermal offset	± 300 V	1A/2A	45 MHz	100	< 3 uV	Temperature reference 4 current channels Config as 2- or 4-wire
34922A	70-channel armature multiplexer	± 300 V	1A/2A	25 MHz	100	< 3 uV	Config as 2- or 4-wire
34923A	40/80-channel reed multiplexer	± 150 V	0.5A/1.5A	45 MHz	500	< 50 uV	Config as 1-, 2- or 4-wire
34924A	70-channel reed multiplexer	± 150 V	0.5A/1.5A	25 MHz	500	< 50 uV	Config as 2- or 4-wire
34925A	40/80-channel optically isolated FET multiplexer	± 80 V	0.02A	1 MHz	1000	< 3 uV	Config as 1-, 2- or 4-wire
Matrix modules							
34931A	Dual 4x8 armature matrix	± 300 V	1A/2A	30 MHz	100	< 3 uV	Backplane expandable
34932A	Dual 4x16 armature matrix	± 300 V	1A/2A	30 MHz	100	< 3 uV	Backplane expandable
34933A	Dual/Quad 4x8 reed matrix	± 150 V	0.5A/1.5A	30 MHz	500	< 50 uV	Backplane expandable Config as 1- or 2-wire
34934A	Quad 4x32 reed matrix	+/-100V	0.5A/0.5A	20MHz	500	<50uV	Row expansion kit. Config as 1- or 2-wire
General-purpose modules							
34937A	28-channel Form C and 4-channel Form A	+/-300 V +/-250 VAC	1A/2A 5 A	10 MHz	N/A	< 3 uV < 3 uV	
34938A	20-channel 5-amp Form A	+/- 250 VAC	5A/8A	1 MHz	N/A	< 3 uV	
34939A	64-channels Form A	+/-100V	1A/2A	10MHz	N/A	<3uV	
RF and microwave modules							
Module	Description	Insertion loss	Isolation	Freq range	VSWR	Input impedance	Comments
34941A	Quad 1x4 50 ohm 3 GHz RF multiplexer	0.6 dB	> 58 dB	3 GHz	< 1.25	50 Ω	@ 1 GHz
34942A	Quad 1x4 75 ohm 1.5 GHz RF multiplexer	0.6 dB	> 60 dB	1.5 GHz	< 1.35	75 Ω	@ 1 GHz
34945A/ 34945EXT	Microwave switch/attenuator driver	Can drive up to 64 external switch coils; 32 SPDT switches, 8 multiport switches, 8 attenuators, or your own combination. Expand with additional 34945EXTs.					
34946A	Dual 1x2 SPDT terminated microwave switch	< 0.42 dB < 0.69 dB < 0.8 dB	> 85 dB > 67 dB > 60 dB	4 GHz or 20 GHz 26.5 GHz	< 1.15 < 1.30 < 1.6	50 Ω	@ 4 GHz @ 20 GHz @ 26.5GHz
34947A	Triple 1x2 SPDT unterminated microwave switch	< 0.42 dB < 0.69 dB < 0.8 dB	> 85 dB > 67 dB > 60 dB	4 GHz or 20 GHz 26.5 GHz	< 1.15 < 1.30 < 1.6	50 Ω	@ 4 GHz @ 20 GHz @ 26.5GHz
System control modules		Description					
34950A	64-bit digital I/O with memory and counter	Eight 8-bit digital I/O channels with programmable polarity, thresholds up to 5 V, with handshaking protocols and pattern memory. Two 10 MHz frequency counter and programmable clock output to 20 MHz.					
34951A	4-channel isolated D/A converter with waveform memory	Output DC voltage up to ± 16 V or DC current up to ± 20 mA. Output waveforms with a 200 kHz update rate and 16 bits of resolution. Use on-board memory to create point-to-point waveforms with more than 500,000 points.					
34952A	Multifunction module with 32-bit DIO, 2-ch D/A and totalizer	Four 8-bit digital I/O channels, two ± 12-V analog outputs, and a 100 kHz gated totalizer.					
34959A	Breadboard module	Create your own custom designs with access to the +12 V and +5 V supplies, 16 GPIO ports and 28 relay drive lines.					



IV.II. Transductor de intensidad

El convertidor de corriente MACX MCR-SL-CAC-5-I-UP contiene una variante de amplia gama con un rango de tensión de alimentación de 19,2 V AC/DC hasta 253 V AC/DC.

Datos técnicos

Datos de entrada

Configurable/Programable	Mediante selector DIP
Umbral de respuesta	0,3 % (1 A)
	0,45 % (5 A)
Margen de ajuste Corriente de entrada mínima	0 A AC ... 1 A AC (configurables)
Margen de ajuste Corriente de entrada máxima	0 A AC ... 5 A AC (configurables)
Capacidad de sobrecorriente	2 x I_N (constante)
Capacidad de sobrecorriente transitoria	20 x I_N (1 s)
Frecuencia nominal f_N	50 Hz
Margen de medición de frecuencia	45 Hz ... 65 Hz
Tipo de conexión	Conexión por tornillo

Datos de salida

Denominación Salida	Salida de corriente
Configurable/Programable	Mediante selector DIP
Señal de salida corriente	0 mA ... 20 mA (configurables)
	4 mA ... 20 mA (configurables)
Corriente máx. de salida	25 mA
Carga/Carga de salida Salida de corriente	< 500 Ω (Con 20 mA)
Indicación de estado	LED rojo (error), LED verde (listo para funcionar)

Salida de conexión

Denominación Salida	sin salida de conmutación
---------------------	---------------------------

Alimentación

Margen de tensión de alimentación	19,2 V AC/DC ... 253 V AC/DC
Absorción de corriente máxima	B = 24 V DC, IOUT = 20 mA)
	B=230 V CA, IOUT=20 mA)
Consumo de potencia	B = 24 V DC, IOUT = 20 mA)
	B= 230 V CA, IOUT=20 mA)

Datos de conexión

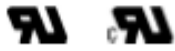
Tipo de conexión	Conexión por tornillo
Sección de conductor rígido mín.	0,2 mm ²
Sección de conductor rígido máx.	2,5 mm ²
Sección de conductor flexible mín.	0,2 mm ²
Sección de conductor flexible máx.	2,5 mm ²
Sección de conductor AWG/kcmil mín.	24
Sección de conductor AWG/kcmil máx.	14
Longitud a desaislar	8 mm
Rosca de tornillo	M3



Datos generales	
Anchura	22,5 mm
Altura	104 mm
Profundidad	114,5 mm
Error de transmisión máximo	≤ 0,5 % (Del valor nominal de la gama bajo condiciones nominales)
Coefficiente de temperatura máximo	< 0,02 %/K
Coefficiente de temperatura típico	< 0,015 %/K
Respuesta gradual (10-90%)	máx. 300 ms
	Típ. 200 ms
Temperatura ambiente (servicio)	-20 °C ... 65 °C (-4 °F...149 °F)
Temperatura ambiente (almacenamiento / transporte)	-40 °C ... 85 °C (-40°F...185°F)
Máx. Altura de fijación	2000 m
Índice de protección	IP20
Categoría de sobretensiones	III
Grado de polución	2
Tensión de prueba Entrada/salida	4 kV (50 Hz, 1 min)
Tensión de prueba Salida/alimentación	2 kV (50 Hz, 1 min)
Compatibilidad electromagnética	Conformidad con la directiva CEM 2004/108/CE
Emisión de interferencias	EN 61000-6-4
Resistencia a interferencias	EN 61000-6-2
Color	verde
Material carcasa	Poliamida PA sin reforzar
Posición para el montaje	Discrecional
Conformidad	Conformidad CE
ATEX	Ex II 3 G Ex nA II T4 X
UL, EE.UU. / Canadá	UL 508 Recognized



Homologaciones



Homologaciones

cULus Recognized

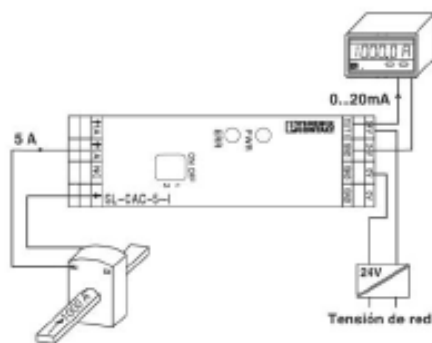
Homologaciones Ex:

ATEX

Homologaciones solicitadas:

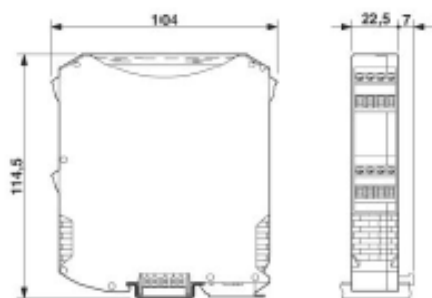
Dibujos

Dibujo de aplicación



Medición de corriente

Esquema de dimensiones



IV.III. TARJETA DE RELÉS

1. Features

- **Relays: 4 SPDT Relays** RAS-05-15. Datasheet - [here](#)
- **Relay parameters:** 5V / 72mA, 15A/24VDC (120VAC), 10A/250VAC
- **4 Digital I/O Port:** Inputs - 0-5VDC TTL levels, with pull-up 200kOhm resistor. Each can be configured as digital output (0-5VDC). In some variants this port may not be reachable by user because it is attached to other device (for example sensor).
- **PCB parameters:** FR4 / 1.5mm / two layers / metalized holes / HAL / white stamp / solder mask / additional PCB openings for better voltage isolation / doubled high voltage tracks.
- **Power supply:** from USB port
- **Current consumption:** 400 mA
- **Chip:** FT245RL. Datasheet - [here](#)
- **Power led:** Yes
- **Relay leds:** Yes
- **Size:** 77mm x 56mm x 17mm



ANEXO II: CANALES DE BENCHLINK DATA LOGGER.

	34980A	Channel	Scan Order	Measurement
1	<1.Instr1>	1001	1	Temp (Type T)
2	<1.Instr1>	1002	2	Temp (Type T)
3	<1.Instr1>	1003	3	Temp (Type T)
4	<1.Instr1>	1004	4	Temp (Type T)
5	<1.Instr1>	1005	5	Temp (Type T)
6	<1.Instr1>	1006	6	Temp (Type T)
7	<1.Instr1>	1007	7	Temp (Type T)
8	<1.Instr1>	1008	8	Temp (Type T)
9	<1.Instr1>	1009	9	Temp (Type T)
10	<1.Instr1>	1010	10	Temp (Type T)
11	<1.Instr1>	1011<5A>	11	Temp (Type T)
12	<1.Instr1>	1012	12	Temp (Type T)
13	<1.Instr1>	1013	13	Temp (Type T)
14	<1.Instr1>	1014	14	Temp (Type T)
15	<1.Instr1>	1015<5E>	15	Temp (Type T)
16	<1.Instr1>	1016	16	Temp (Type T)
17	<1.Instr1>	1017<A7>	17	Temp (Type T)
18	<1.Instr1>	1018	18	Temp (Type T)
19	<1.Instr1>	1019	19	Temp (Type T)
20	<1.Instr1>	1020	20	Temp (Type T)
21	<1.Instr1>	1021<E7>	21	Temp (Type T)
22	<1.Instr1>	1022	22	Temp (Type T)
23	<1.Instr1>	1023<A9>	23	Temp (Type T)
24	<1.Instr1>	1024	24	Temp (Type T)
25	<1.Instr1>	1025	25	Temp (Type T)
26	<1.Instr1>	1026	26	Temp (Type T)
27	<1.Instr1>	1027<E9>	27	Temp (Type T)
28	<1.Instr1>	1028<A10>	28	Temp (Type T)
29	<1.Instr1>	1029	29	Temp (Type T)
30	<1.Instr1>	1030	30	Temp (Type T)
31	<1.Instr1>	1031	31	Temp (Type T)
32	<1.Instr1>	1032<E10>	32	Temp (Type T)
33	<1.Instr1>	1033	33	Temp (Type T)
34	<1.Instr1>	1034	34	Temp (Type T)
35	<1.Instr1>	1035	35	Temp (Type T)
36	<1.Instr1>	1036	36	Temp (Type T)
37	<1.Instr1>	1037	37	Temp (Type T)
38	<1.Instr1>	1038	38	Temp (Type T)
39	<1.Instr1>	1039	39	Temp (Type T)
40	<1.Instr1>	1040	40	Temp (Type T)



41	<1.Instr1>	2001<C1 Q1>	41	Frequency
42	<1.Instr1>	2002<C1 Q2>	42	Frequency
43	<1.Instr1>	2003<C1 Q3>	43	Frequency
44	<1.Instr1>	2007<T ³ PE>	44	Temp 4-Wire RTD
45	<1.Instr1>	2008<T ³ PE>	45	Temp 4-Wire RTD
46	<1.Instr1>	2009<TENSION C1>	46	AC Voltage
47	<1.Instr1>	2011<RTD E C1>	47	Temp 4-Wire RTD
48	<1.Instr1>	2013<RTD S C1>	48	Temp 4-Wire RTD
49	<1.Instr1>	2017<RTD AMB>	49	Temp 4-Wire RTD
50	<1.Instr1>	2042<CAUDAL C1>	50	DC Current
51	<1.Instr1>	2043<I1>	51	DC Current
52	<1.Instr1>	9001<Potencia 1>		Multiply

Tabla 19: Canales data-logger.



ANEXO III: ENSAYOS DE CALOR CON LÁMINAS INSERTADAS.

ANEXO III: ENSAYOS TT 84.

Características:

TIPO	d (mm)	p (mm)	e (mm)	p/d	e/d
TT	7	84	0,7	12	0,1

Tabla 20: Característica para TT 84.

Se han ensayado con dos potencias diferentes: 400 W/m² y 800 W/m². Para cada potencia se ha estudiado la evolución de la temperatura para los caudales siguientes:

Potencia W/m ²	Potencia W	Gasto másico	Potencia W/m ²	Potencia W	Gasto másico
800 w/m2	468 w	150 kg/h	400 w/m2	234 w	150 kg/h
800 w/m2	468 w	96 kg/h	400 w/m2	234 w	96 kg/h
800 w/m2	468 w	63 kg/h	400 w/m2	234 w	63 kg/h
800 w/m2	468 w	41 kg/h	400 w/m2	234 w	41 kg/h
800 w/m2	468 w	27 kg/h	400 w/m2	234 w	27 kg/h

Tabla 21: Ensayos para TT 84.

Desarrollo de ensayos:

- Cálculo de número de Nusselt frente a la longitud del tubo.
- Cálculo de la temperatura del absorbedor a lo largo del tubo.
- Cálculo de la temperatura en la sección J.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.



G:27 kg/h P:400 w/m²:

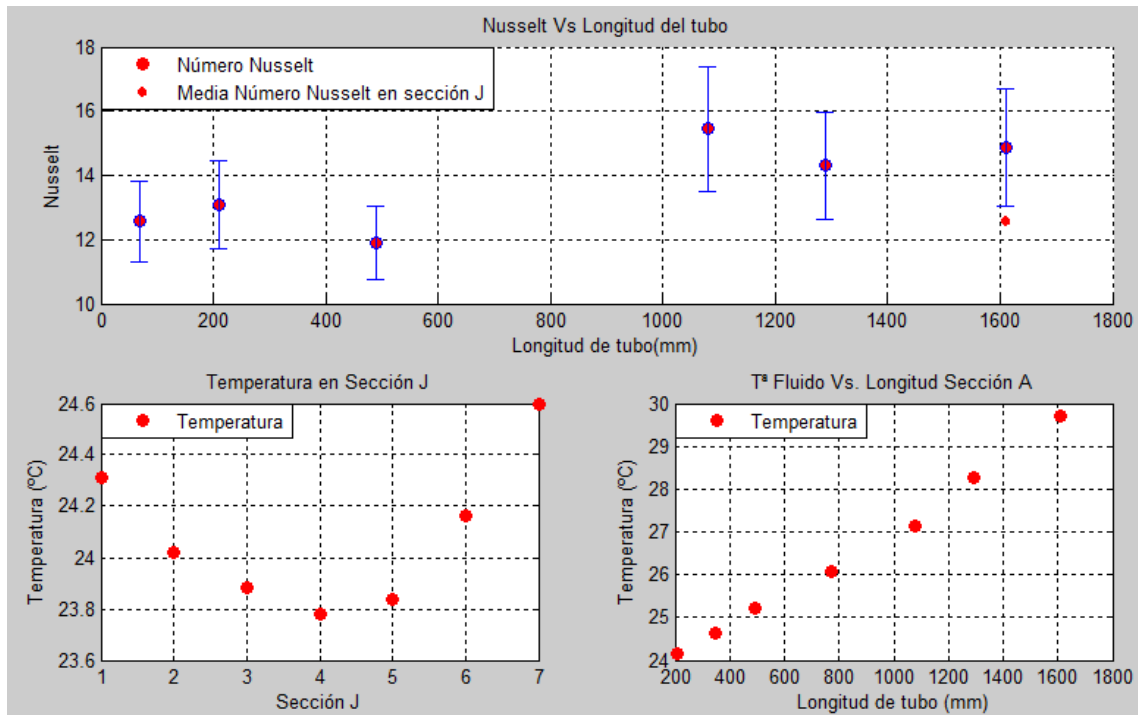


Figura 135: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:27 kg/h P:800 w/m²:

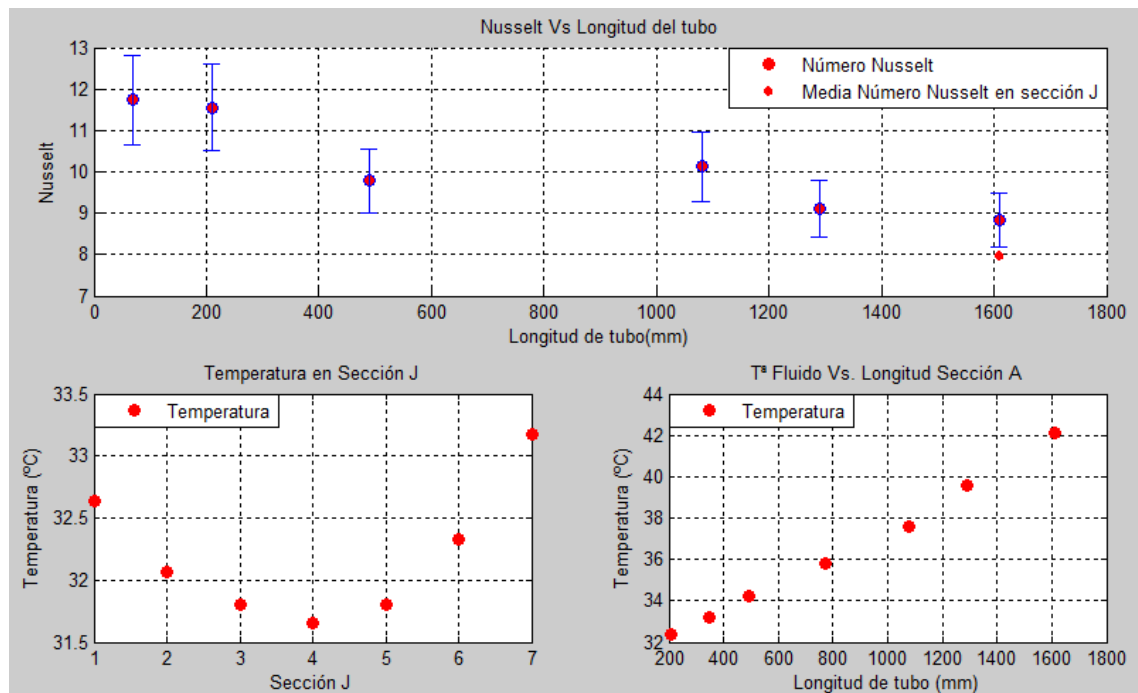


Figura 136: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:41 kg/h P:400 w/m²:

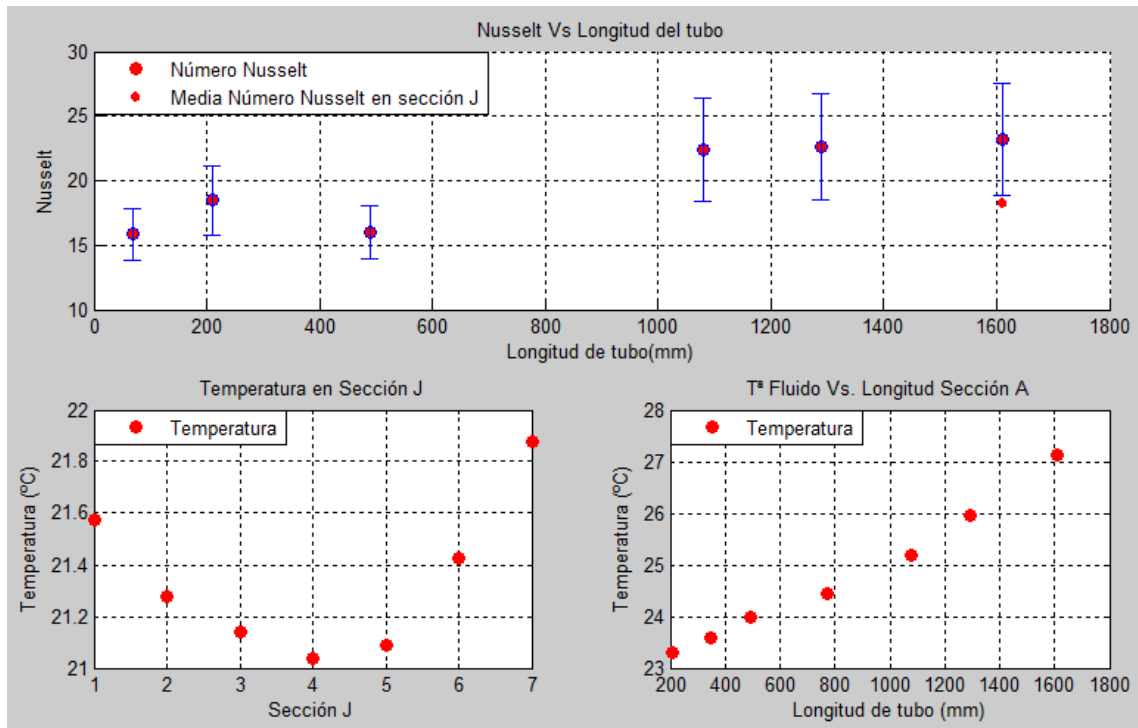


Figura 137: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:41 kg/h P:800 w/m²:

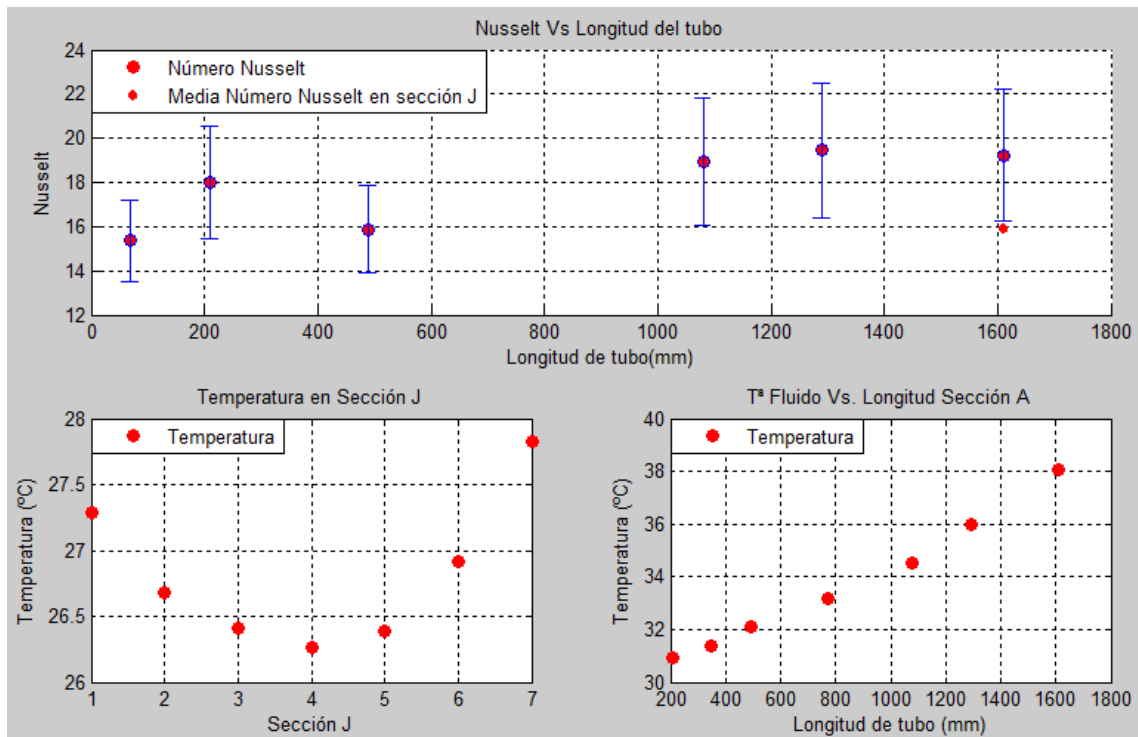


Figura 138: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:63 kg/h P:400 w/m²:

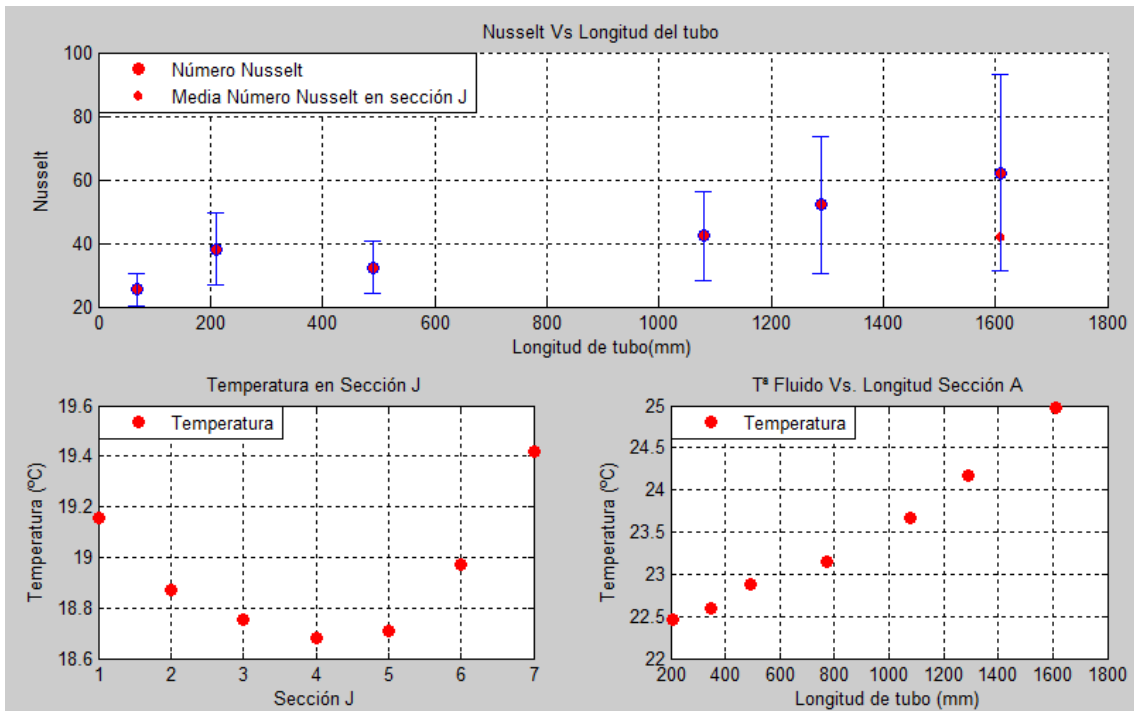


Figura 139: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:63 kg/h P:800 w/m²:

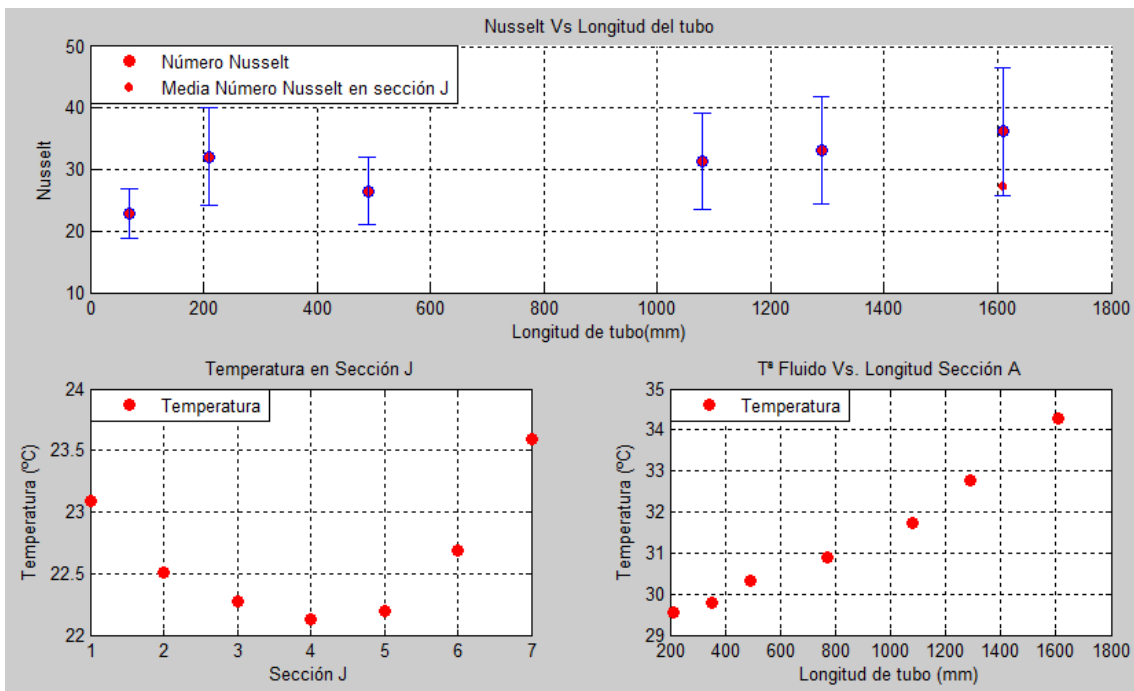


Figura 140: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:96 kg/h P:400 w/m²:

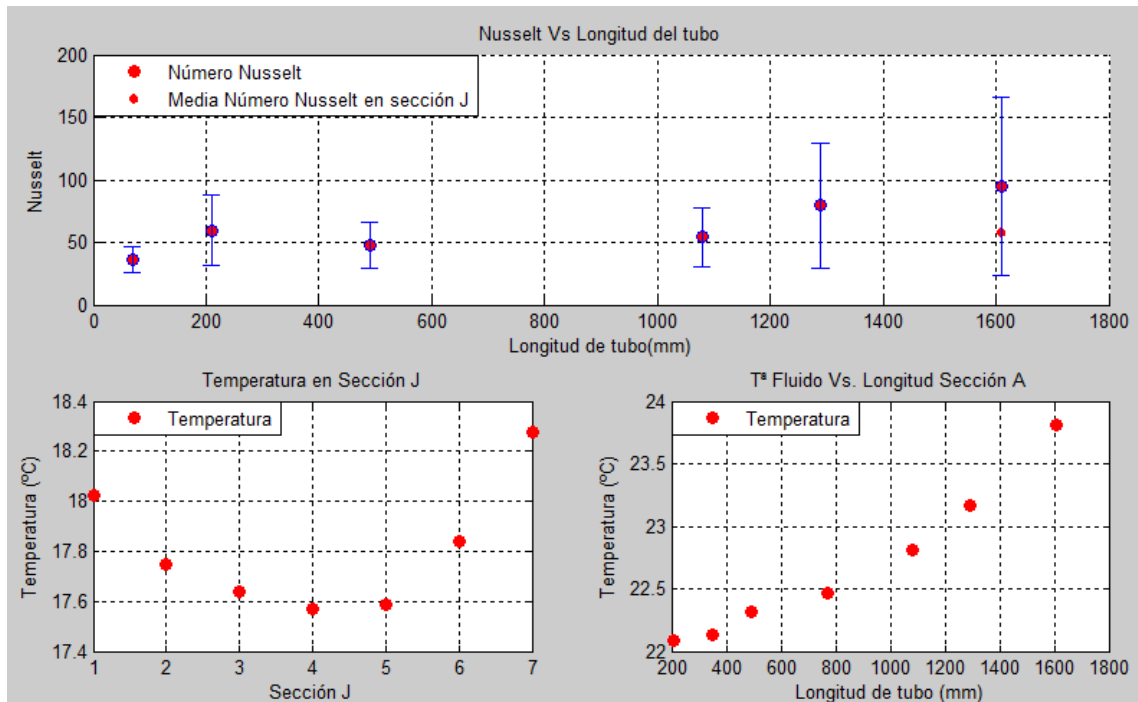


Figura 141: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:96 kg/h P:800 w/m²:

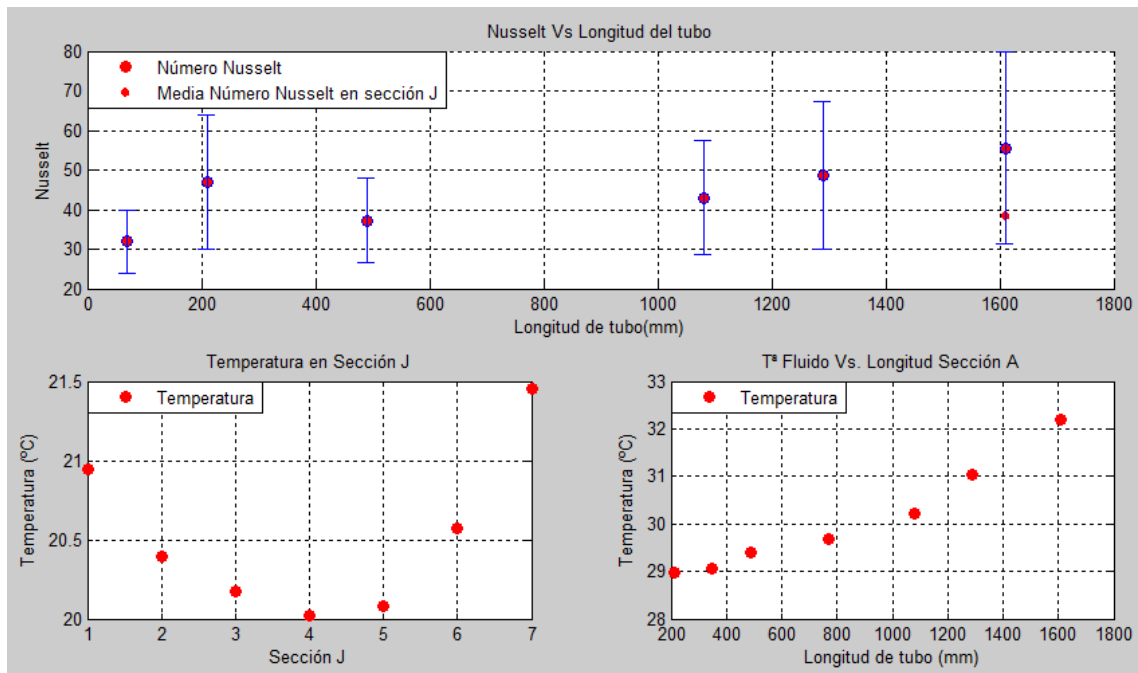


Figura 142: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:150 kg/h P:400 w/m²:

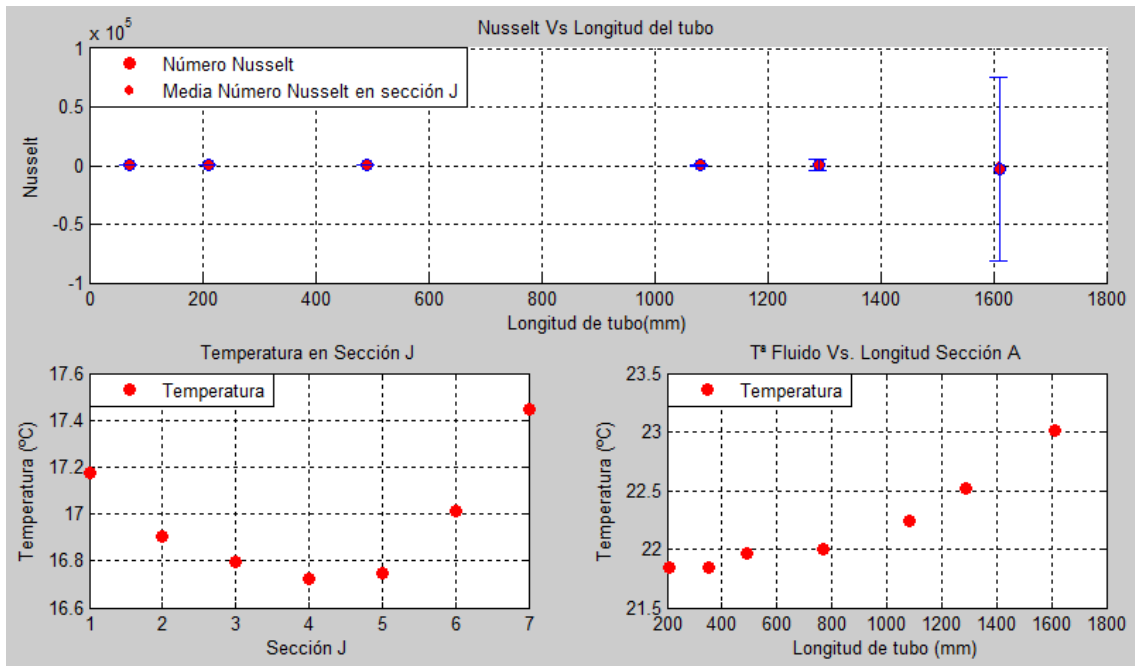


Figura 143: Tª de fluído a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:150 kg/h P:800 w/m²:

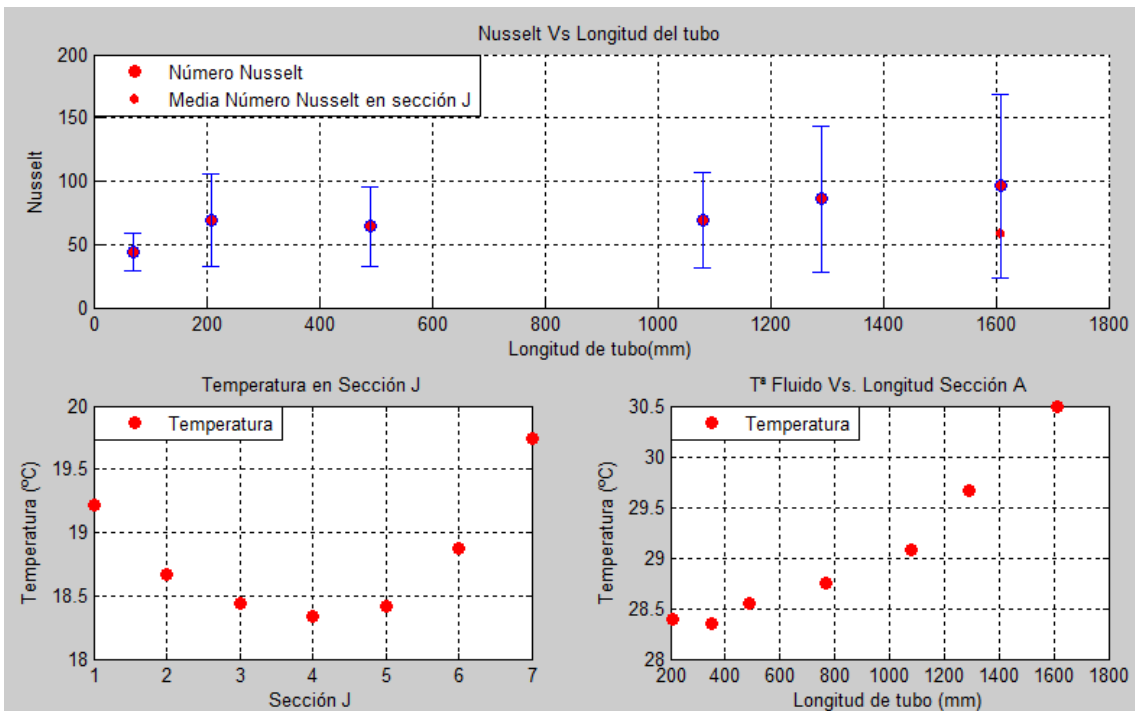


Figura 144: Tª de fluído a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



ANÁLISIS DE RESULTADOS:

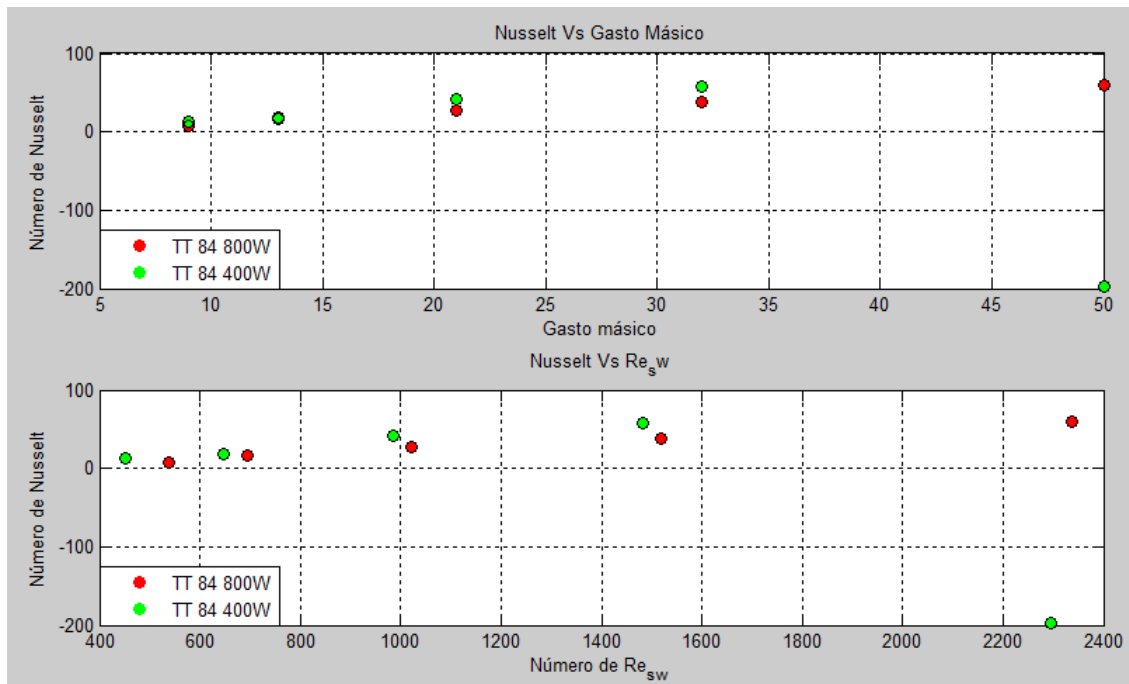


Figura 145: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. Re_{sw} .

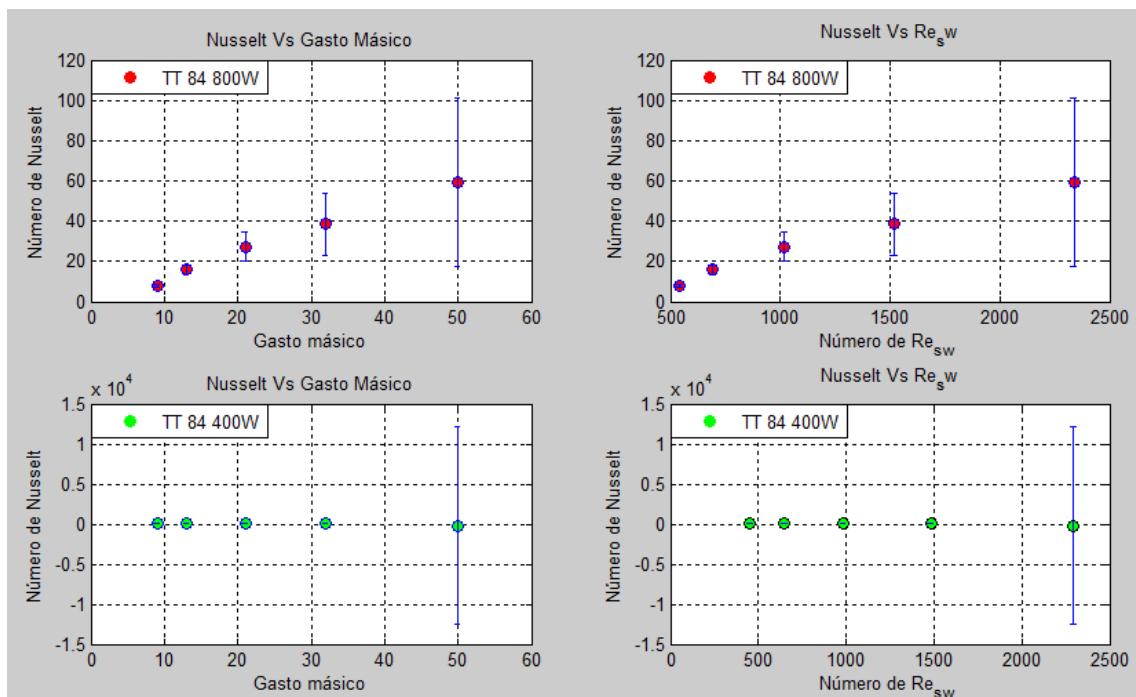


Figura 146: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. Re_{sw} .



➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².

Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	12,565	13,103	11,899	15,456	14,302	14,881
41 kg/h		15,830	18,474	16,027	22,400	22,625	23,145
63 kg/h		25,460	38,189	32,269	42,250	52,057	62,176
96 kg/h		36,460	59,591	47,753	54,223	79,462	94,673
150 kg/h		54,492	104,685	102,852	153,684	764,707	-3507,980

Tabla 22: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².

➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	11,745	11,555	9,780	10,128	9,119	8,826
41 kg/h		15,359	18,014	15,864	18,952	19,446	19,239
63 kg/h		22,838	32,117	26,496	31,384	33,087	36,167
96 kg/h		31,967	46,899	37,283	42,931	48,649	55,570
150 kg/h		43,830	68,958	63,758	69,176	85,461	95,546

Tabla 23: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

➤ Nusselt e incertidumbre de Nusselt.

Potencia	TT 84 800W/m2			TT 84 400W/m2		
Gasto Másico	Nu_HW	uNu_HW	Resw_HW	Nu_LW	uNu_LW	Resw_LW
27 kg/h	7,971	0,843	538,971	12,605	1,536	452,380
41 kg/h	15,829	2,551	694,234	18,297	3,206	648,315
63 kg/h	27,297	7,410	1020,342	41,783	15,246	983,905
96 kg/h	38,542	15,532	1518,625	57,385	33,429	1482,140
150 kg/h	59,426	41,450	2337,123	-256,657	-15344,217	2294,594

Tabla 24: Nusselt e incertidumbre de Nusselt.



ANEXO III: ENSAYOS TT 126.

Características:

TIPO	d (mm)	p (mm)	e (mm)	p/d	e/d
TT	7	126	0,7	18	0,1

Tabla 25: Característica para TT 126.

Se han ensayado con dos potencias diferentes: 400 W/m^2 y 800 W/m^2 . Para cada potencia se ha estudiado la evolución de la temperatura para los caudales siguientes:

Potencia W/m^2	Potencia W	Gasto másico	Potencia W/m^2	Potencia W	Gasto másico
800 w/m2	468 w	150 kg/h	400 w/m2	234 w	150 kg/h
800 w/m2	468 w	96 kg/h	400 w/m2	234 w	96 kg/h
800 w/m2	468 w	63 kg/h	400 w/m2	234 w	63 kg/h
800 w/m2	468 w	41 kg/h	400 w/m2	234 w	41 kg/h
800 w/m2	468 w	27 kg/h	400 w/m2	234 w	27 kg/h

Tabla 26: Ensayos para TT 126.

Desarrollo de ensayos:

- Cálculo de número de Nusselt frente a la longitud del tubo.
- Cálculo de la temperatura del absorbedor a lo largo del tubo.
- Cálculo de la temperatura en la sección J.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.



G:27 kg/h P:400 w/m²:

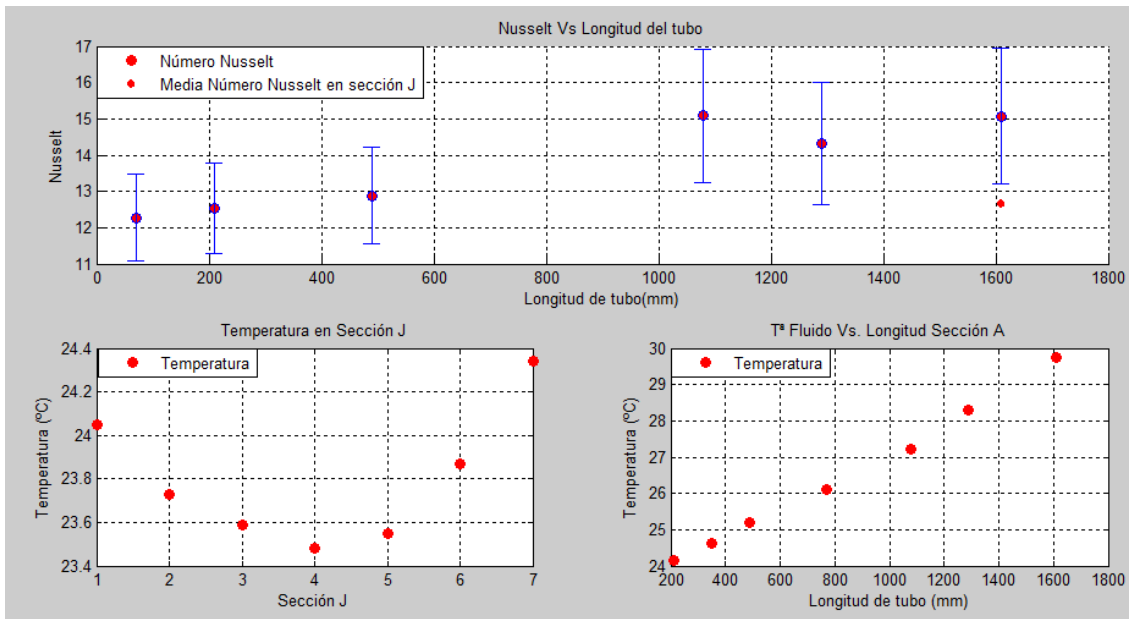


Figura 147: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:27 kg/h P:800 w/m²:

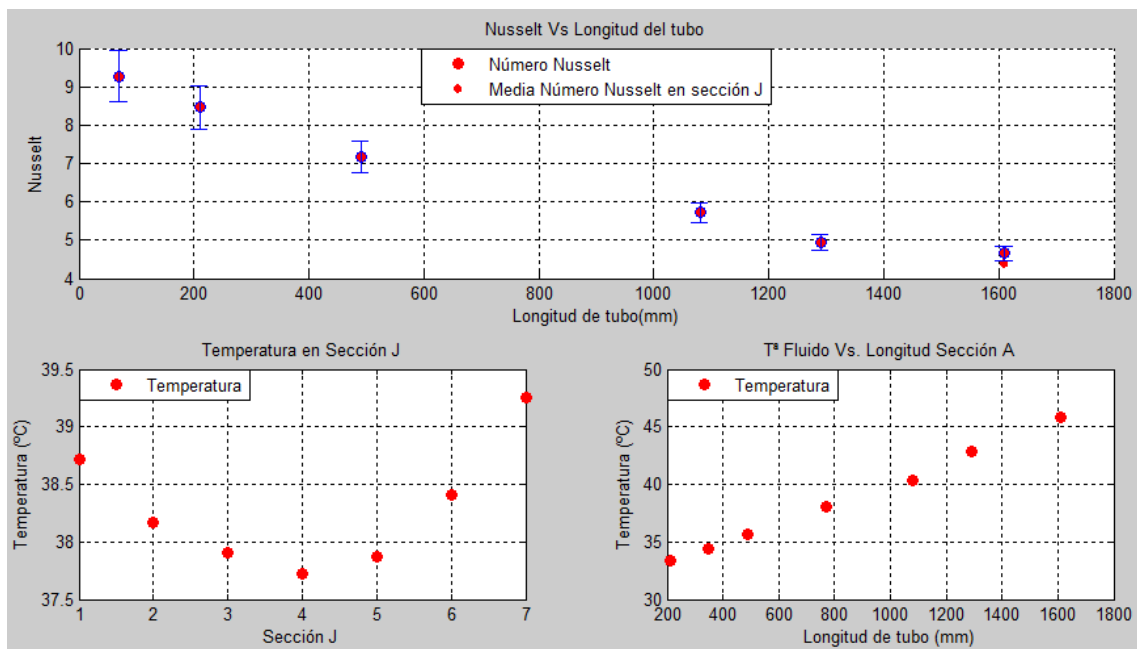


Figura 148: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:41 kg/h P:400 w/m²:

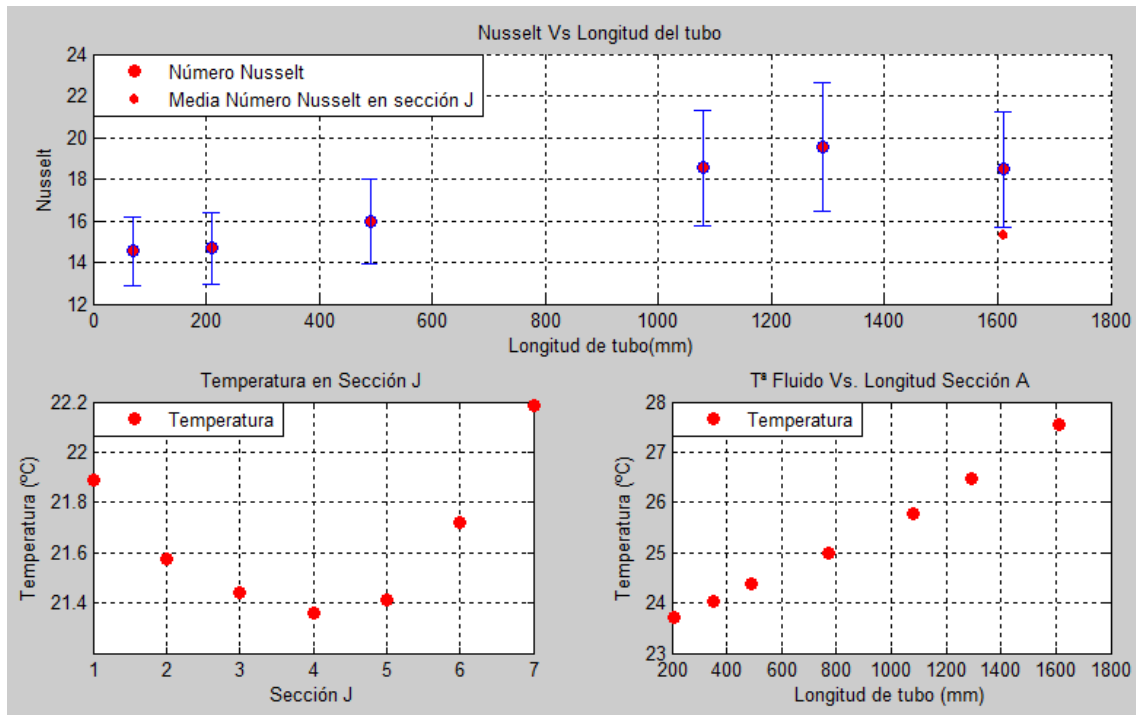


Figura 149: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:41 kg/h P:800 w/m²:

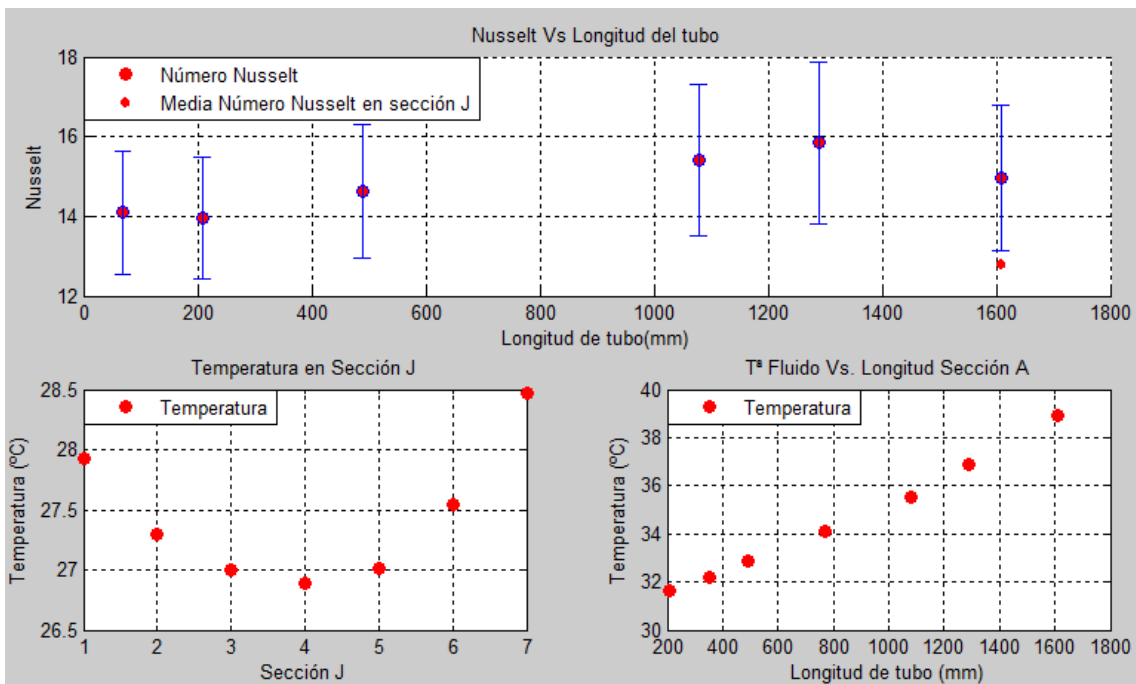


Figura 150: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:63 kg/h P:400 w/m²:

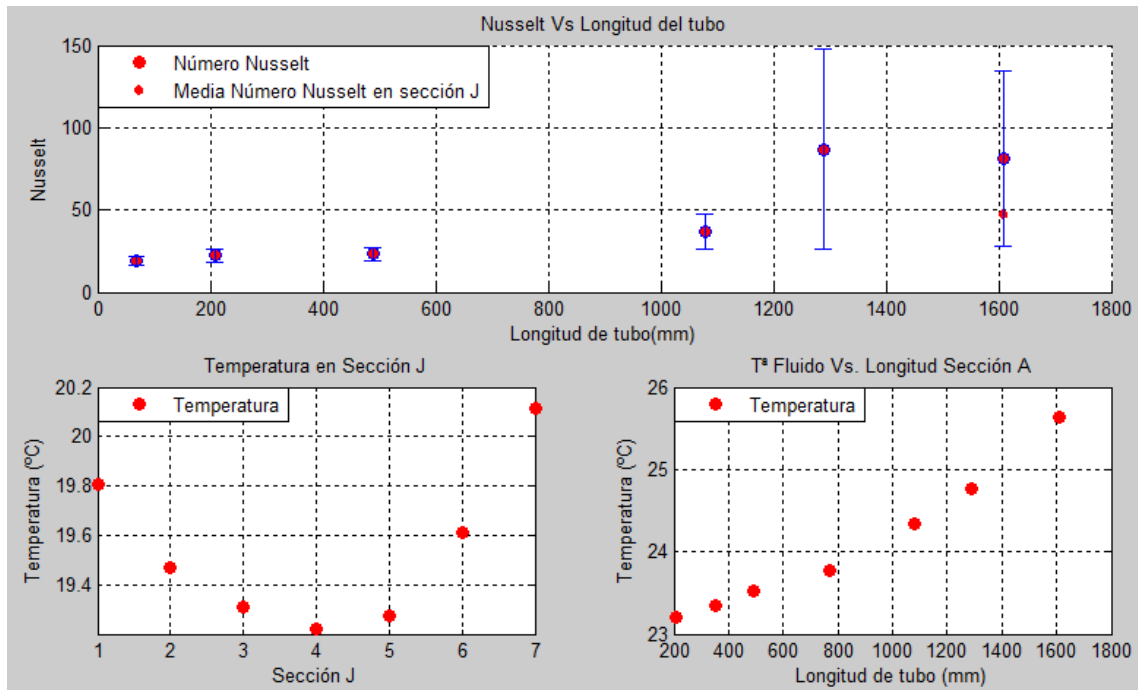


Figura 151: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:63 kg/h P:800 w/m²:

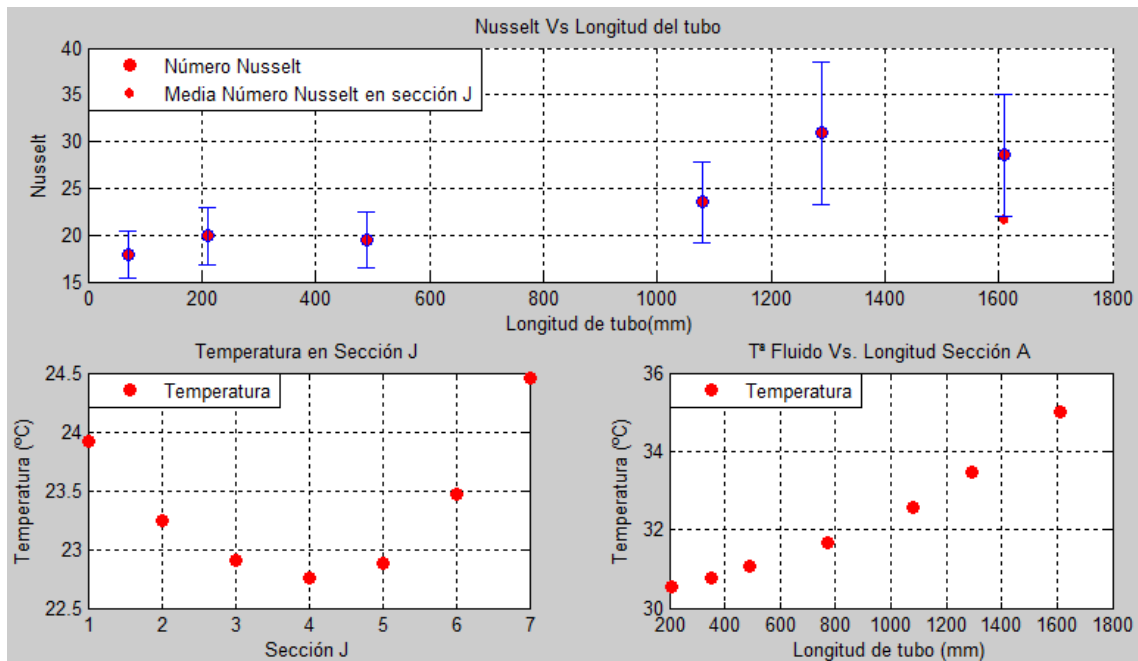


Figura 152: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:96 kg/h P:400 w/m²:

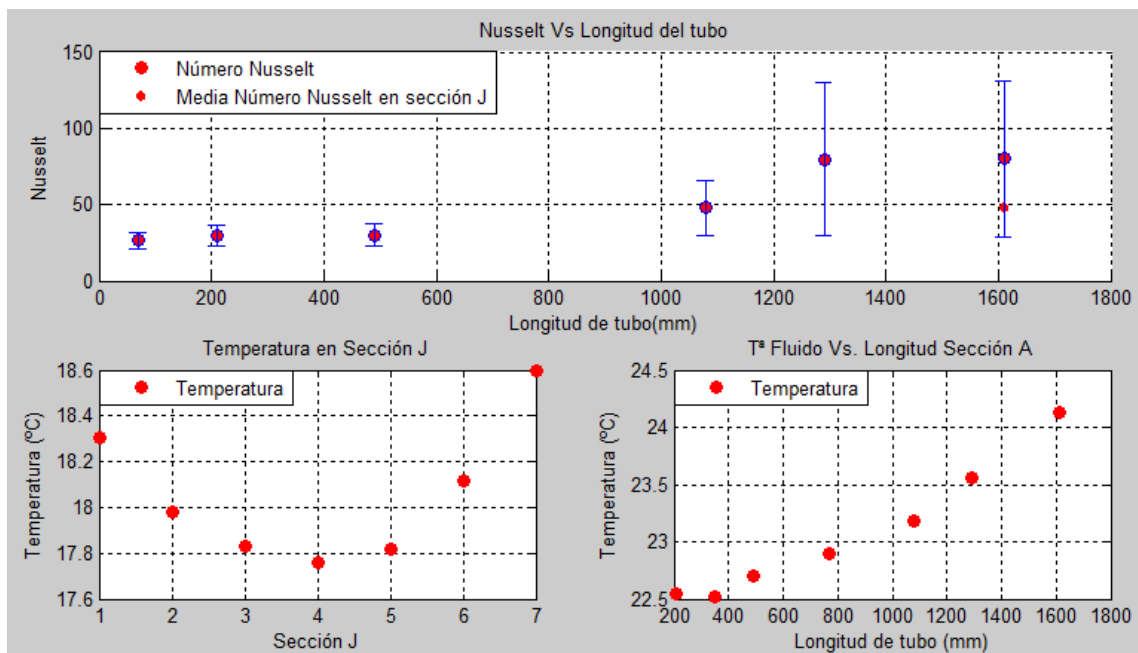


Figura 153: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:96 kg/h P:800 w/m²:

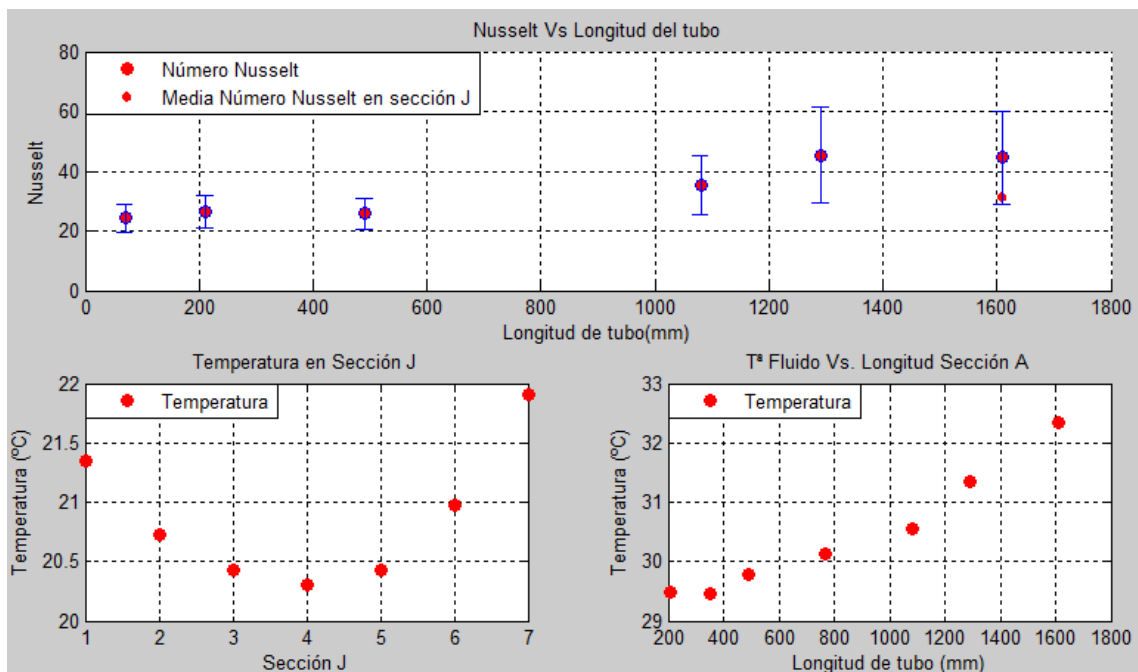


Figura 154: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:150 kg/h P:400 w/m²:

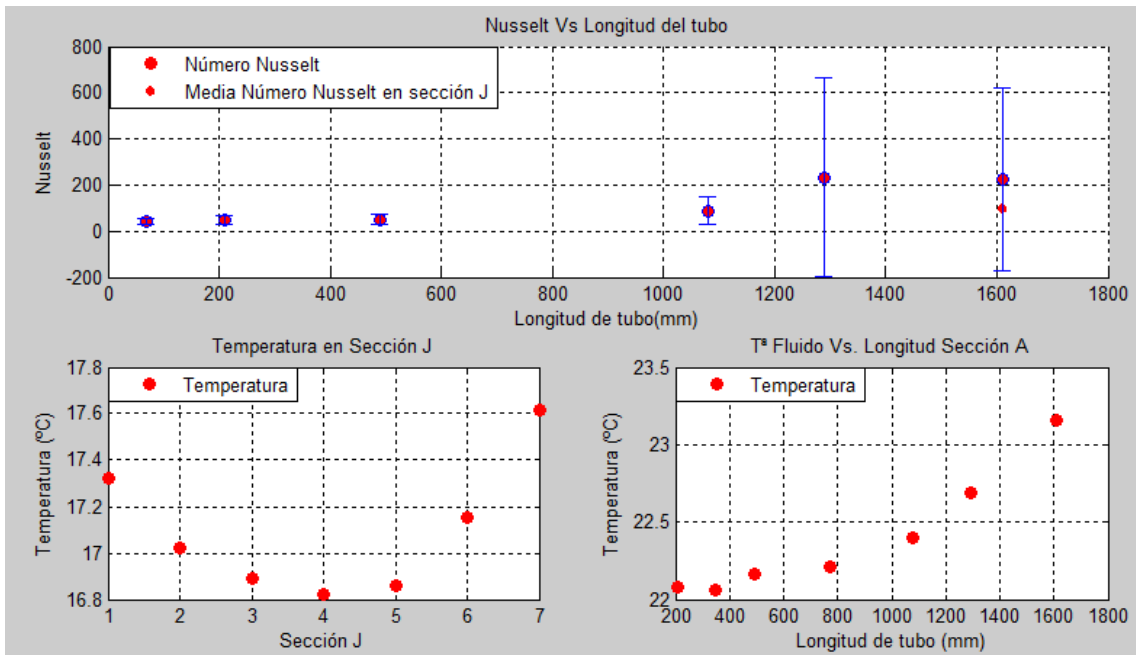


Figura 155: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:150 kg/h P:800 w/m²:

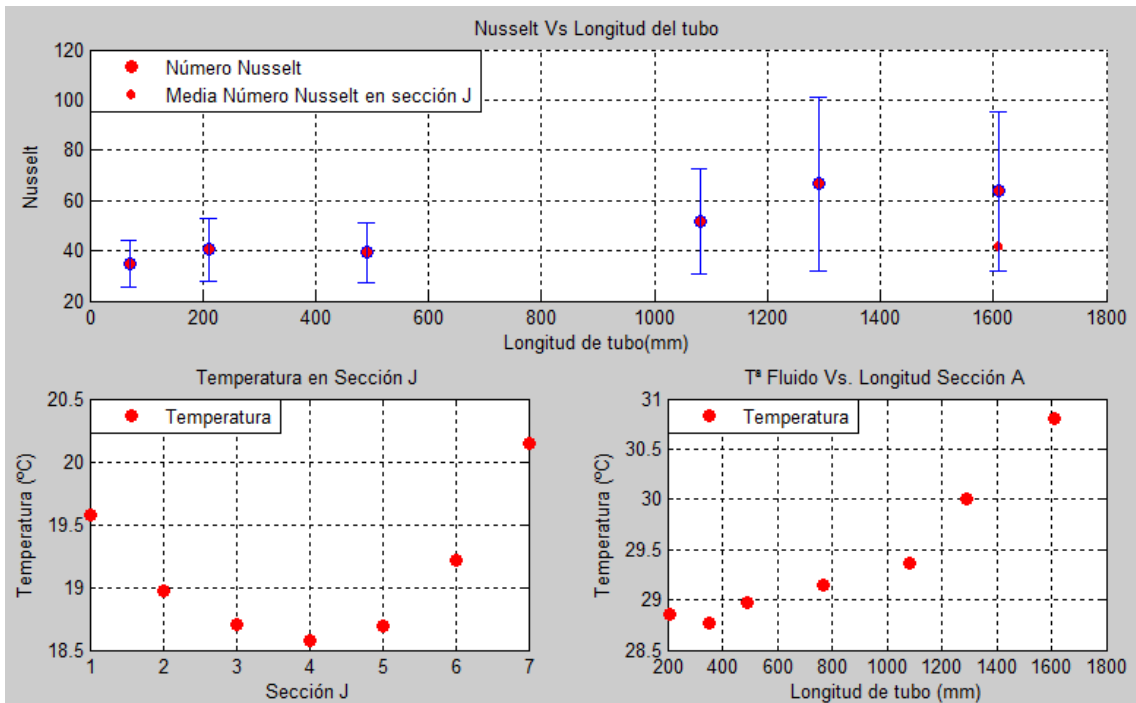


Figura 156: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



ANÁLISIS DE RESULTADOS:

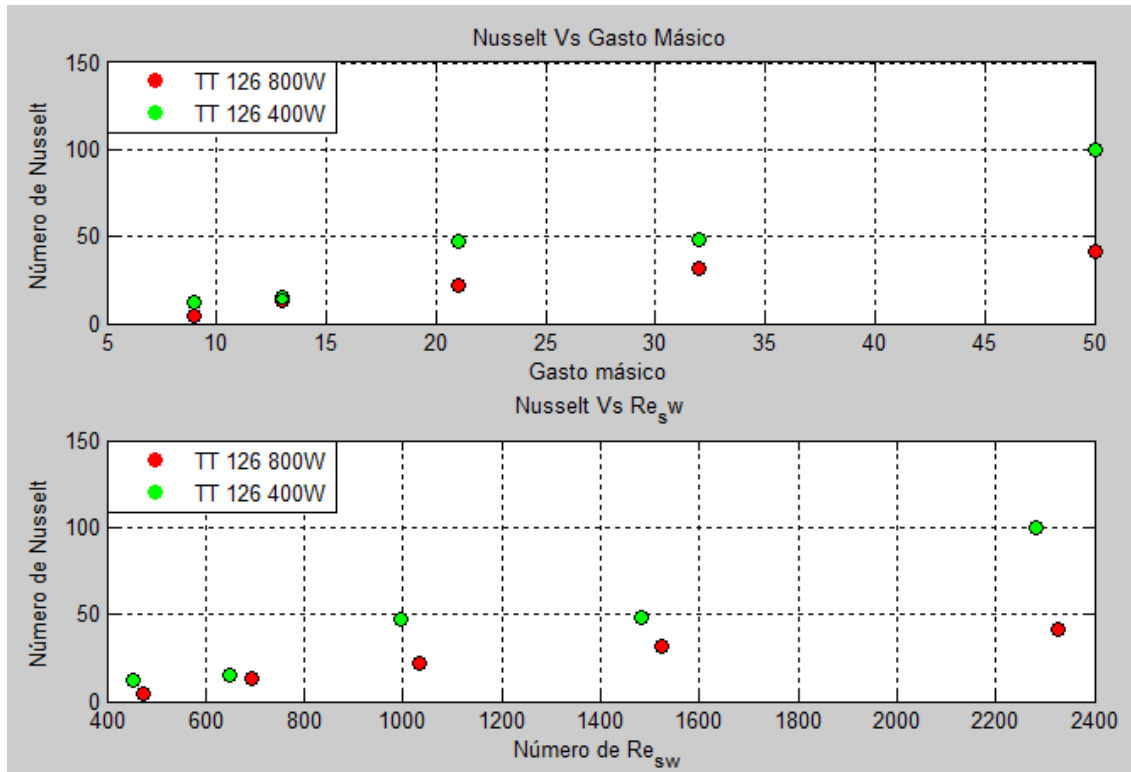


Figura 157: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. Re_{sw} .

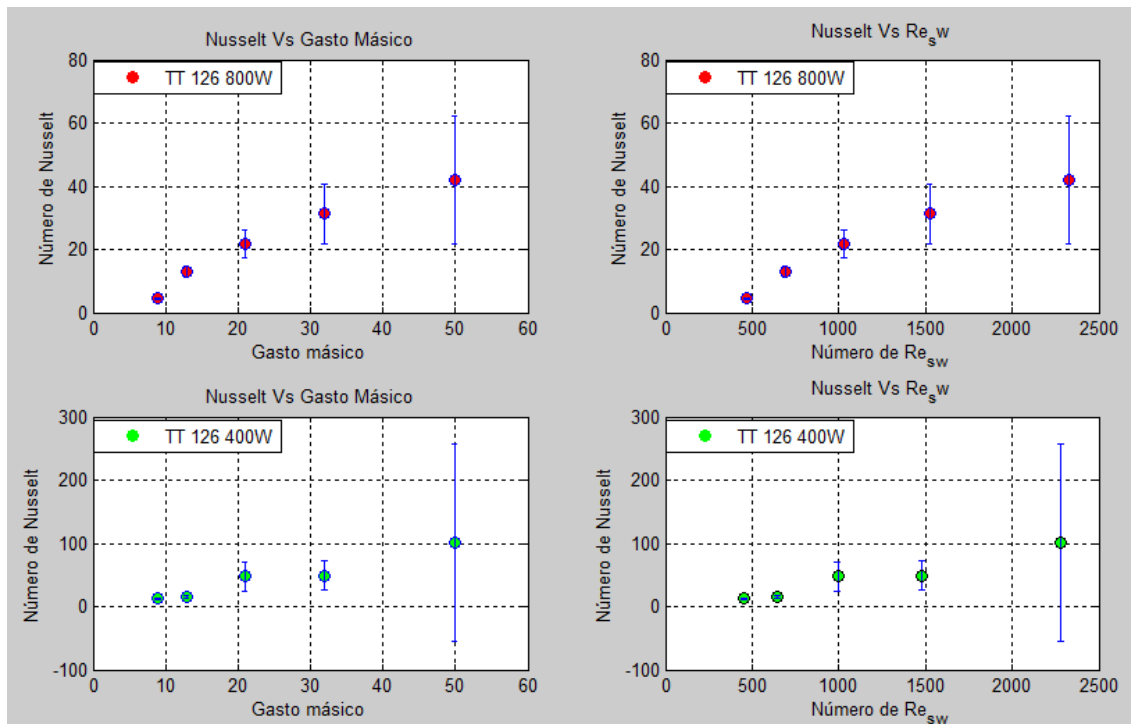


Figura 158: Nusselt Vs.Gasto Másico. Nusselt Vs. Re_{sw} .



➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².

Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	12,272	12,530	12,886	15,139	14,365	15,135
41 kg/h		14,528	14,674	15,992	18,527	19,528	18,467
63 kg/h		18,922	22,293	23,320	37,292	90,037	84,104
96 kg/h		26,450	29,613	30,190	47,841	79,722	80,223
150 kg/h		39,450	48,164	50,576	88,053	233,264	224,062

Tabla 27: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².

➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	9,273	8,464	7,184	5,717	4,942	4,657
41 kg/h		14,081	13,980	14,696	15,420	15,867	14,955
63 kg/h		17,891	19,907	19,550	23,502	30,946	28,556
96 kg/h		24,334	26,446	25,813	35,482	45,258	44,529
150 kg/h		34,870	40,487	39,395	51,974	66,872	63,792

Tabla 28: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

➤ Nusselt e incertidumbre de Nusselt.

Potencia	TT 126 800W/m2			TT 126 400W/m2		
Gasto Másico	Nu_HW	uNu_HW	Resw_HW	Nu_LW	uNu_LW	Resw_LW
27 kg/h	4,388	0,385	472,744	12,611	1,537	454,978
41 kg/h	12,831	1,759	690,157	15,305	2,338	648,630
63 kg/h	21,665	4,515	1032,628	48,747	23,975	994,063
96 kg/h	31,364	9,480	1525,100	47,524	23,184	1481,908
150 kg/h	41,998	20,317	2326,293	100,264	156,084	2283,086

Tabla 29: Nusselt e incertidumbre de Nusselt.



ANEXO IV: ENSAYOS DE CALOR CON MUELLES RÍGIDOS.

ANEXO IV: ENSAYOS WC02.

Características:

TIPO	d (mm)	p (mm)	e (mm)	p/d	e/d
WC 02	7	7,5	1,4	1,1	0,2

Tabla 30: Característica para WC 02.

Se han ensayado con dos potencias diferentes: 400 W/m² y 800 W/m². Para cada potencia se ha estudiado la evolución de la temperatura para los caudales siguientes:

Potencia W/m ²	Potencia W	Gasto másico	Potencia W/m ²	Potencia W	Gasto másico
800 w/m2	468 w	150 kg/h	400 w/m2	234 w	150 kg/h
800 w/m2	468 w	96 kg/h	400 w/m2	234 w	96 kg/h
800 w/m2	468 w	63 kg/h	400 w/m2	234 w	63 kg/h
800 w/m2	468 w	41 kg/h	400 w/m2	234 w	41 kg/h
800 w/m2	468 w	27 kg/h	400 w/m2	234 w	27 kg/h

Tabla 31: Ensayos para WC 02.

Desarrollo de ensayos:

- Cálculo de número de Nusselt frente a la longitud del tubo.
- Cálculo de la temperatura del absorbedor a lo largo del tubo.
- Cálculo de la temperatura en la sección J.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.



G:27 kg/h P:400 w/m²:

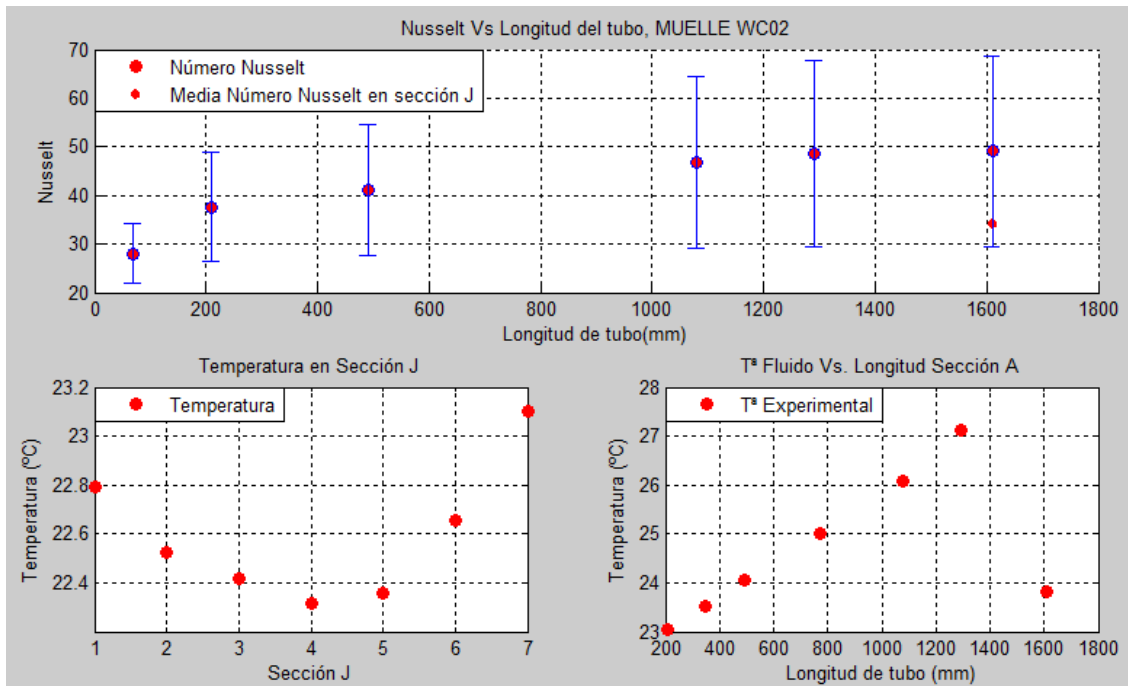


Figura 159: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:27 kg/h P:800 w/m²:

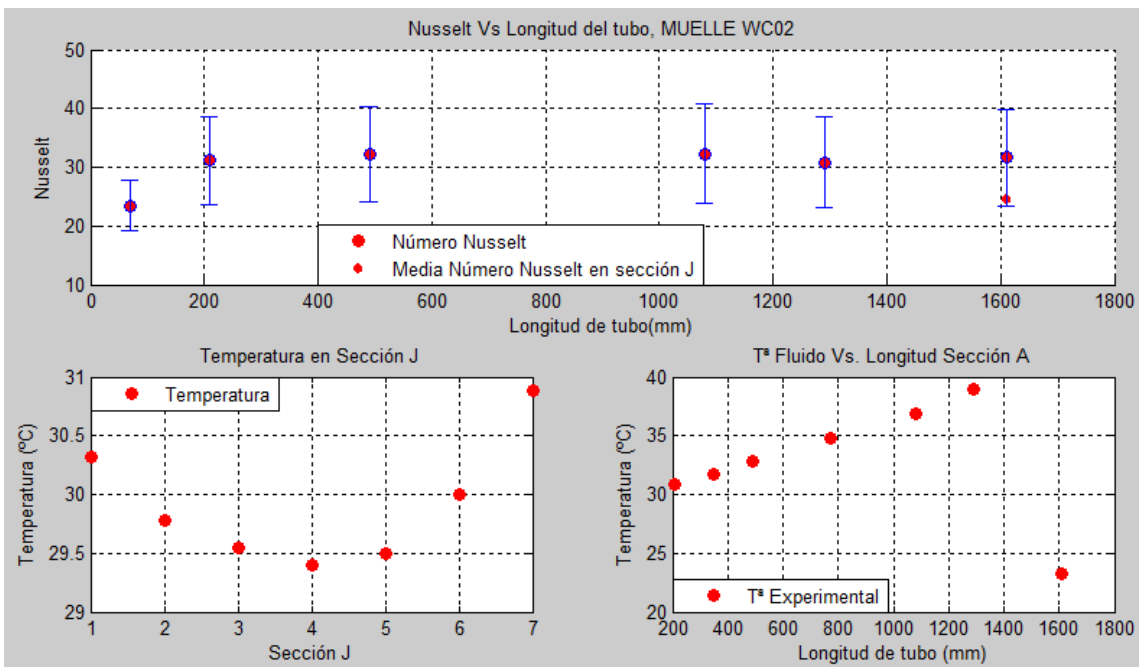


Figura 160: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:41 kg/h P:400 w/m²:

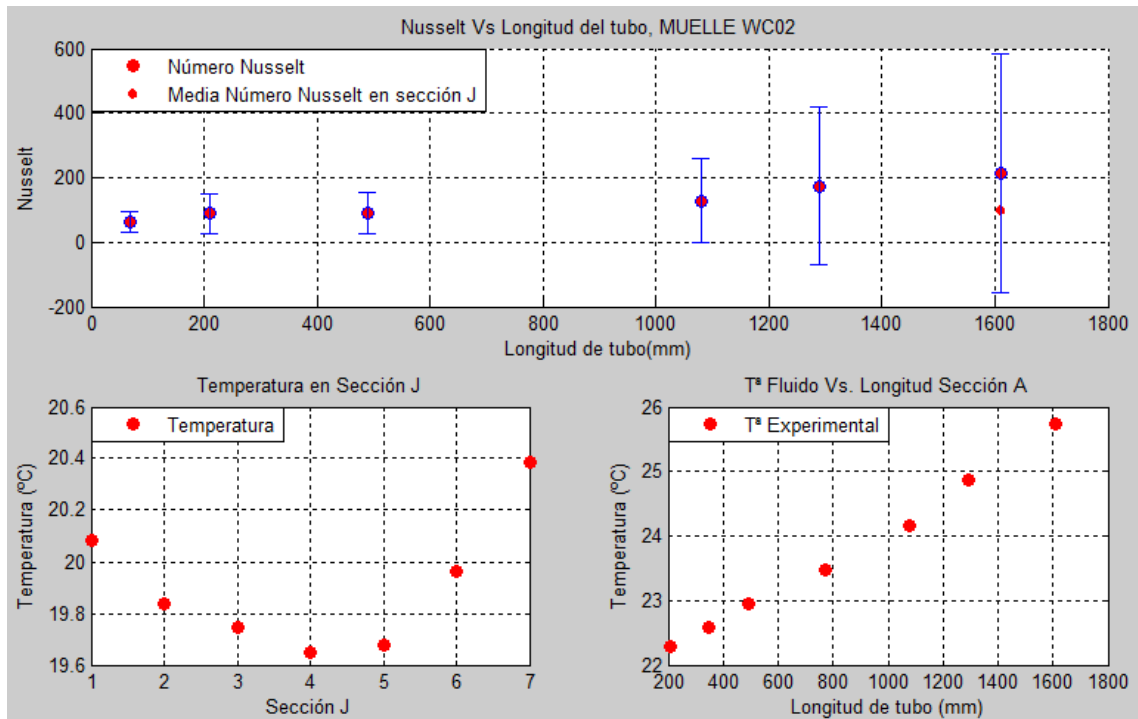


Figura 161: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:41 kg/h P:800 w/m²:

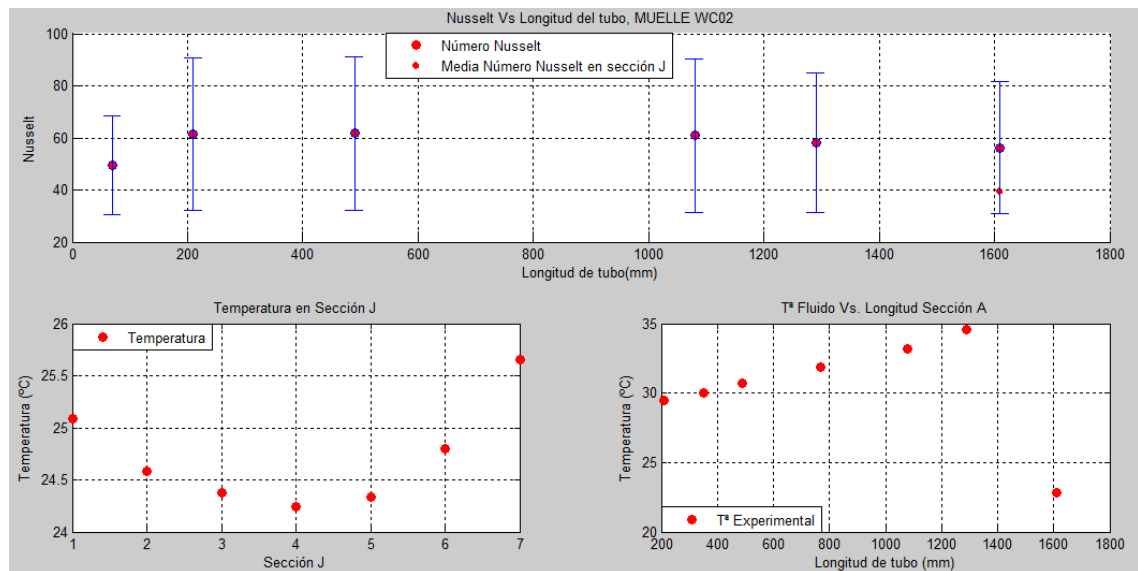


Figura 162: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:63 kg/h P:400 w/m²:

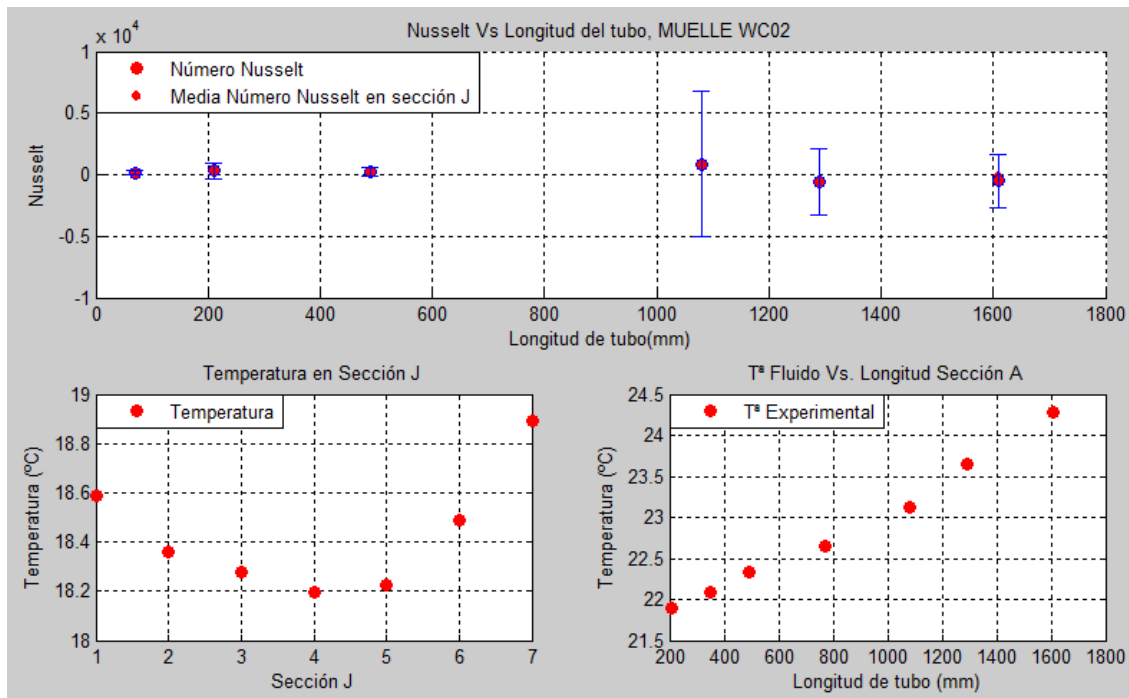


Figura 163: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:63 kg/h P:800 w/m²:

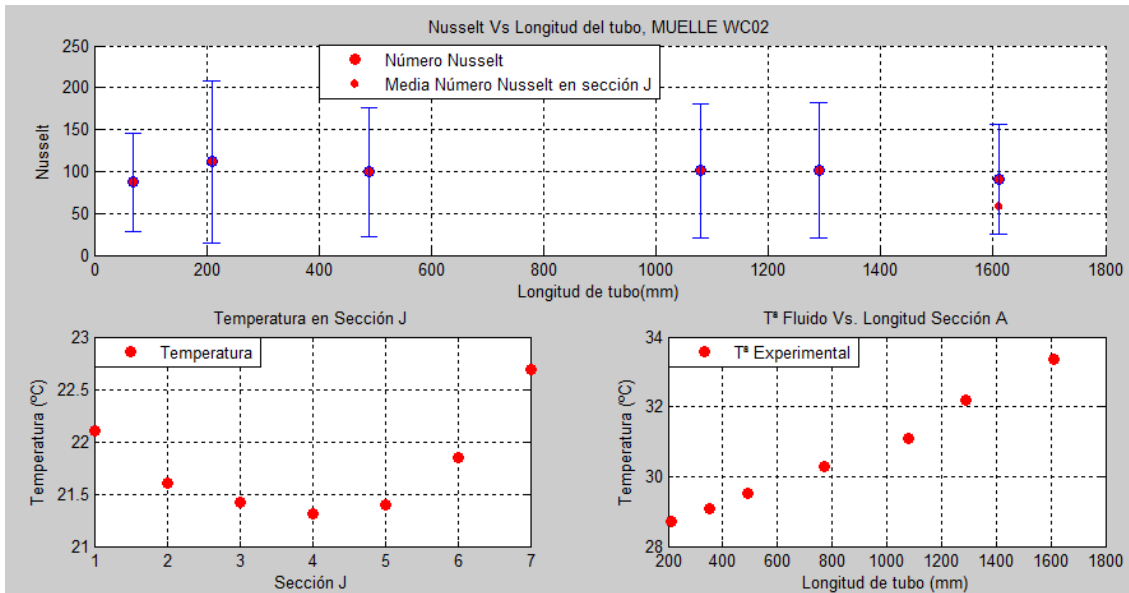


Figura 164: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:96 kg/h P:400 w/m²:

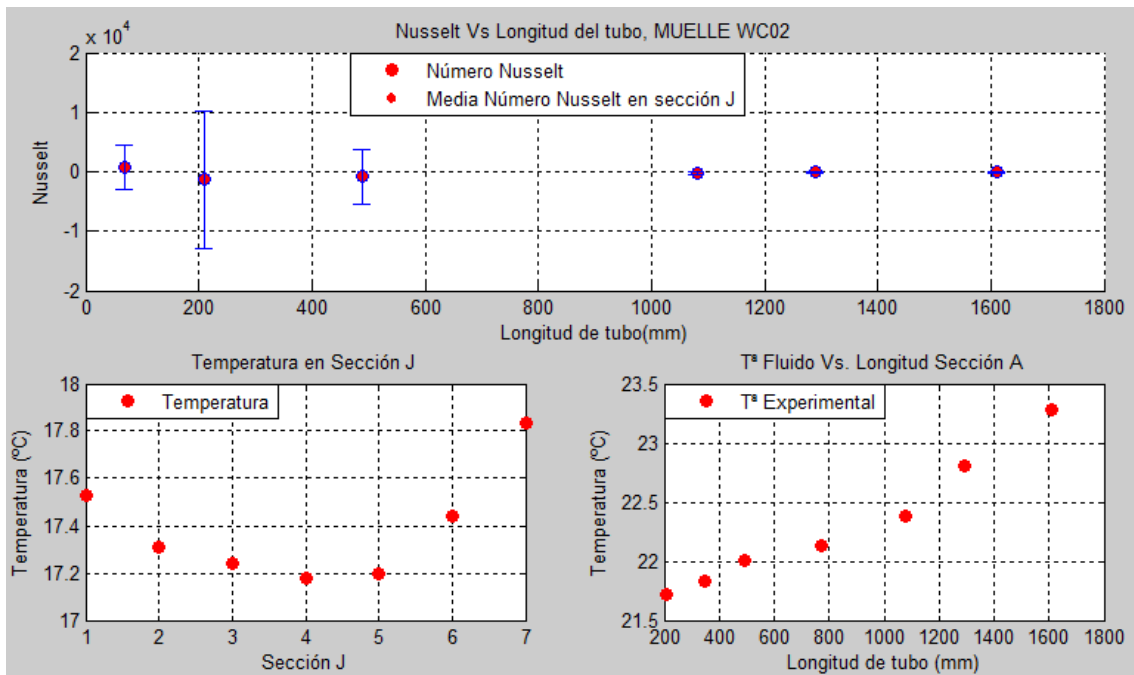


Figura 165: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:96 kg/h P:800 w/m²:

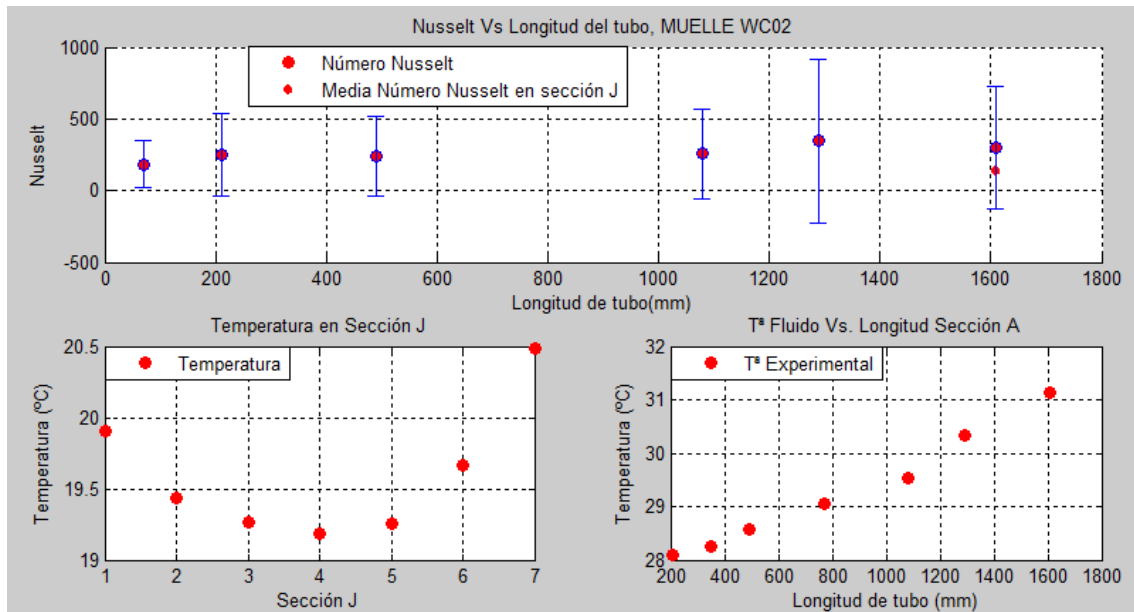


Figura 166: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



ANÁLISIS DE RESULTADOS:

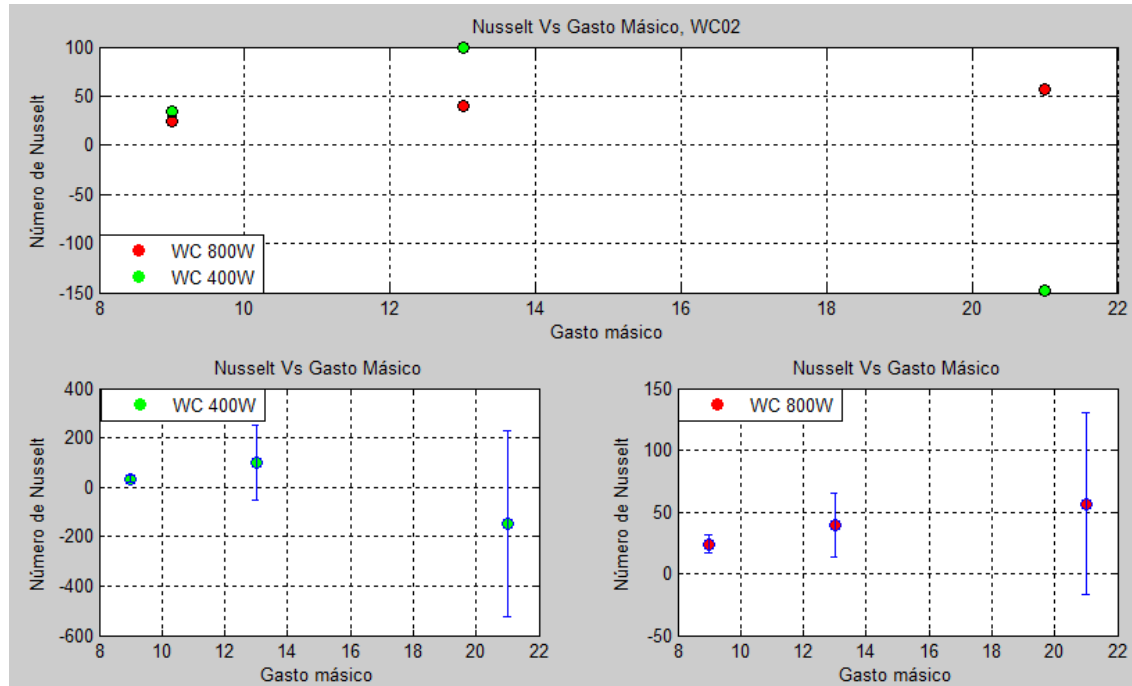


Figura 167: Nusselt Vs.Gasto Másico.

➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².

Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	11,226	12,109	10,851	10,714	9,950	12,728
41 kg/h		20,539	21,514	17,790	19,763	18,216	30,266
63 kg/h		39,374	37,526	35,677	40,647	47,000	1239,707
96 kg/h							
150 kg/h							

Tabla 32: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².



➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	10,400	10,773	10,507	10,975	9,751	11,787
41 kg/h		17,789	19,928	17,648	18,580	17,181	22,258
63 kg/h		32,938	32,758	33,111	37,424	37,039	56,177
96 kg/h							
150 kg/h							

Tabla 33: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

➤ Nusselt e incertidumbre de Nusselt.

Potencia	WC02 800W/m2		WC02 400W/m2	
Gasto Másico	Nu_HW	uNu_HW	Nu_LW	uNu_LW
27 kg/h	23,956	7,169	34,528	14,632
41 kg/h	39,300	26,303	99,929	150,626
63 kg/h	56,531	73,555	-148,248	374,512
96 kg/h				
150 kg/h				

Tabla 34: Nusselt e incertidumbre de Nusselt.



ANEXO IV: ENSAYOS WC03.

Características:

TIPO	d (mm)	p (mm)	e (mm)	p/d	e/d
WC 03	7	7	1,4	1	0.07

Tabla 35: Característica para WC 03.

Se han ensayado con dos potencias diferentes: 400 W/m² y 800 W/m². Para cada potencia se ha estudiado la evolución de la temperatura para los caudales siguientes:

Potencia W/m ²	Potencia W	Gasto másico	Potencia W/m ²	Potencia W	Gasto másico
800 w/m2	468 w	150 kg/h	400 w/m2	234 w	150 kg/h
800 w/m2	468 w	96 kg/h	400 w/m2	234 w	96 kg/h
800 w/m2	468 w	63 kg/h	400 w/m2	234 w	63 kg/h
800 w/m2	468 w	41 kg/h	400 w/m2	234 w	41 kg/h
800 w/m2	468 w	27 kg/h	400 w/m2	234 w	27 kg/h

Tabla 36: Ensayos para WC 03.

Desarrollo de ensayos:

- Cálculo de número de Nusselt frente a la longitud del tubo.
- Cálculo de la temperatura del absorbedor a lo largo del tubo.
- Cálculo de la temperatura en la sección J.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.
- Cálculo de número de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del número de Reynolds.
- Cálculo de la Incertidumbre de Nusselt medio de la sección J respecto del gasto másico.



G:27 kg/h P:400 w/m²:

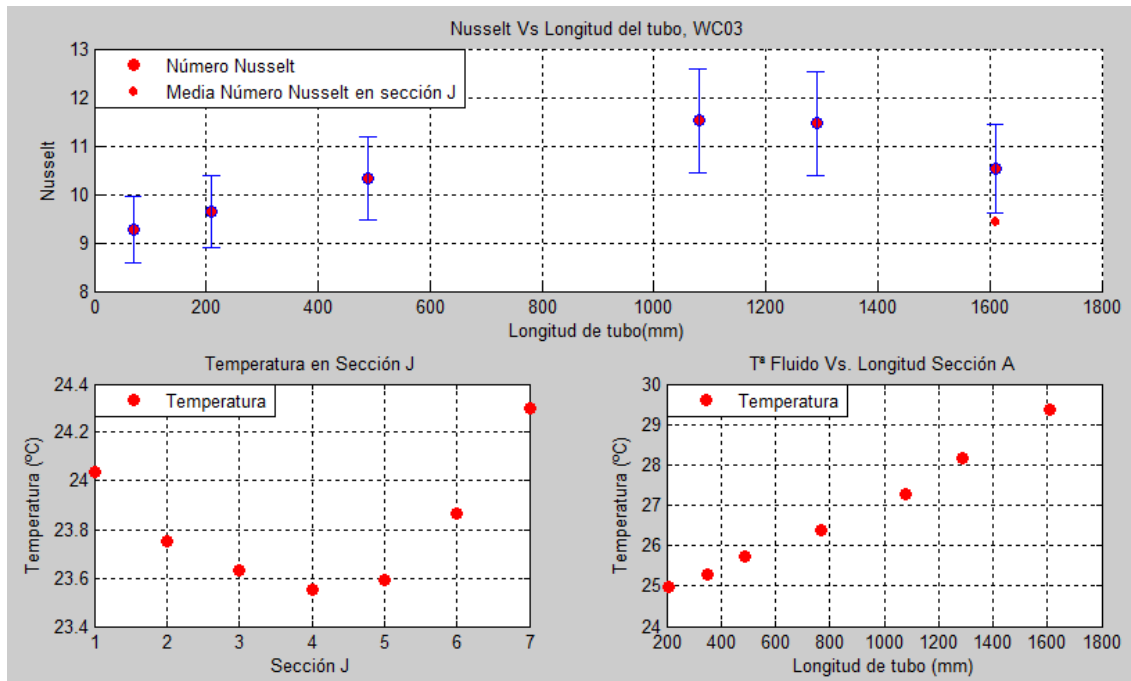


Figura 168: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:27 kg/h P:800 w/m²:

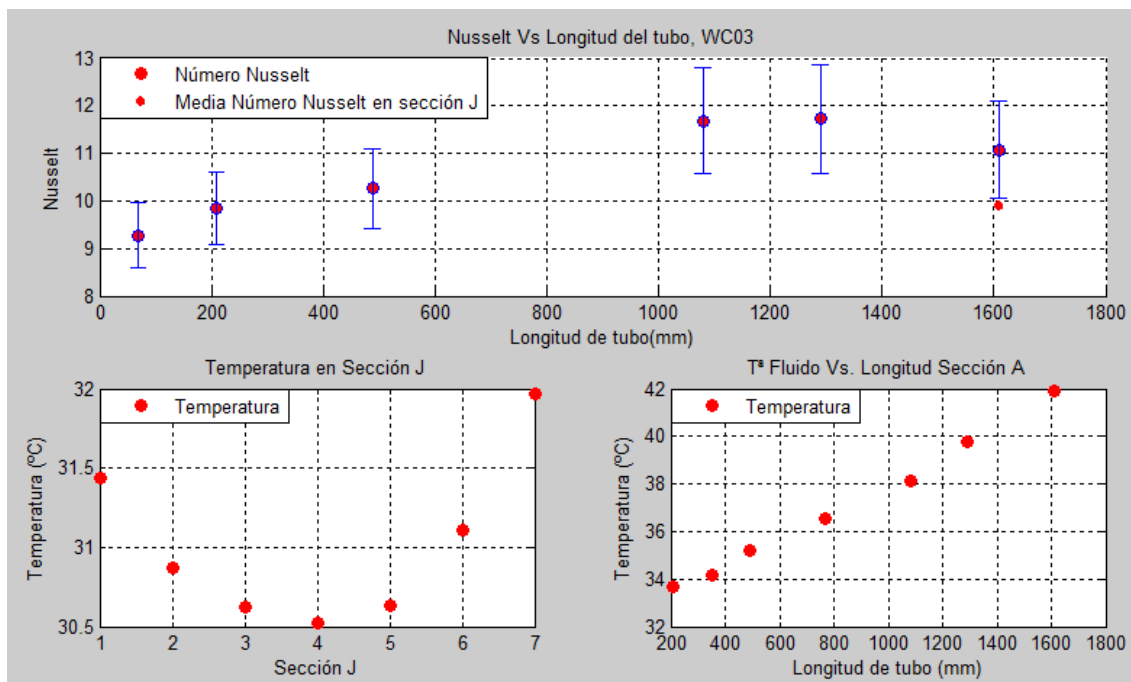


Figura 169: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:41 kg/h P:400 w/m²:

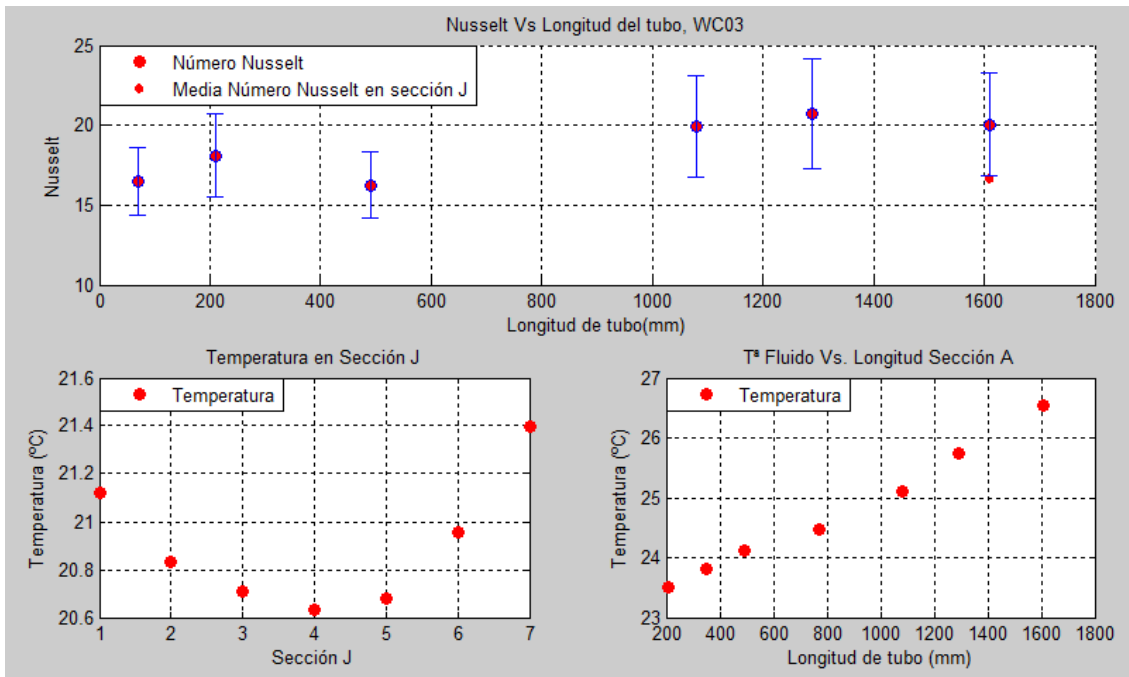


Figura 170: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:41 kg/h P:800 w/m²:

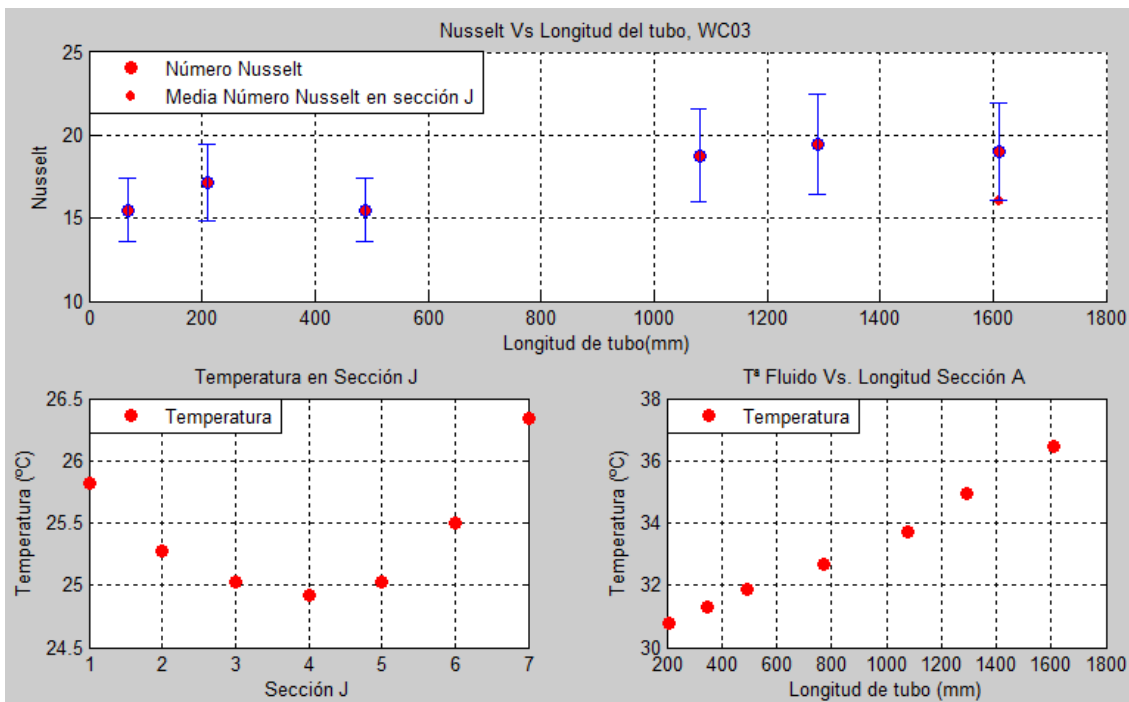


Figura 171: T^a de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:63 kg/h P:400 w/m²:

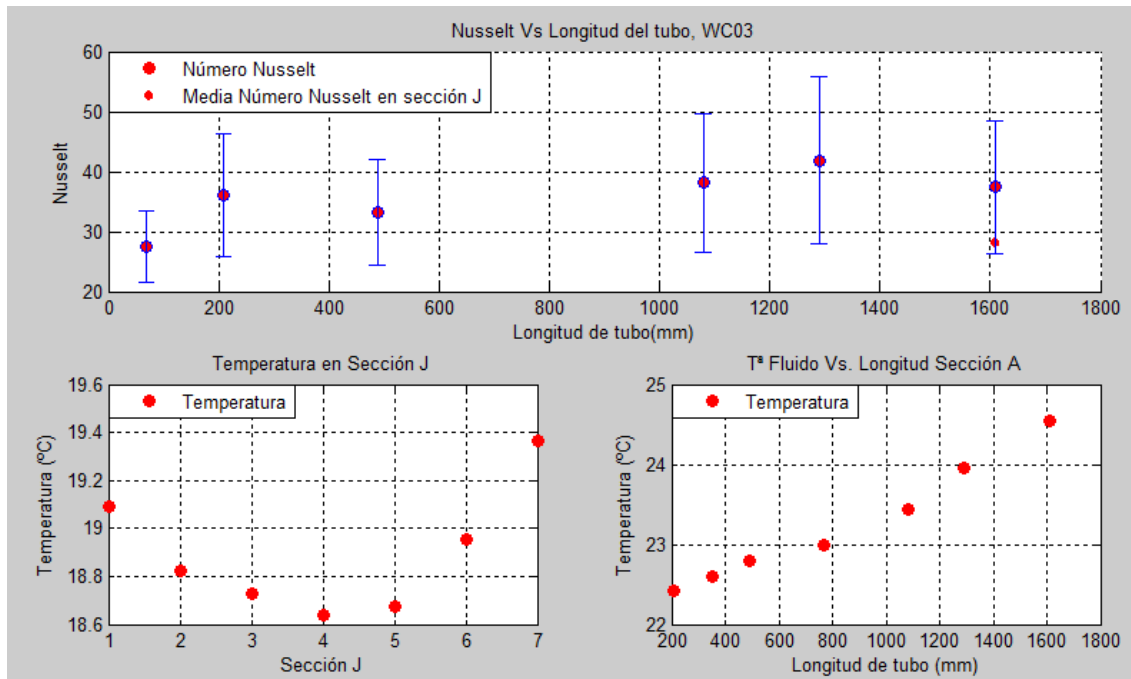


Figura 172: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:63 kg/h P:800 w/m²:

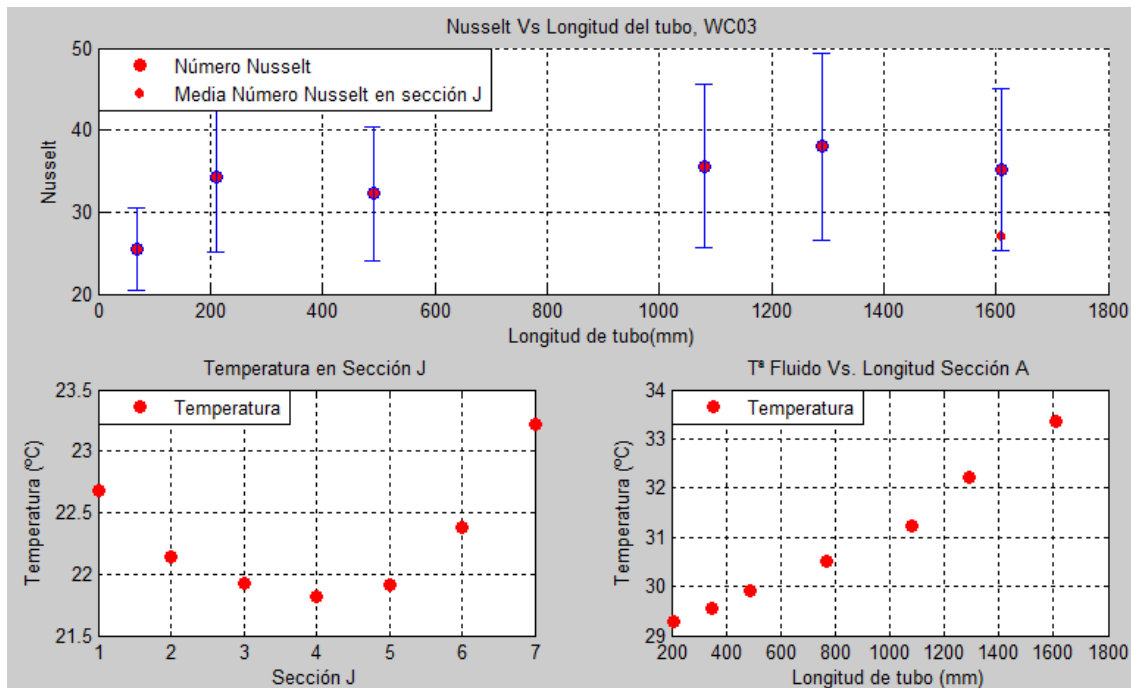


Figura 173: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:96 kg/h P:400 w/m²:

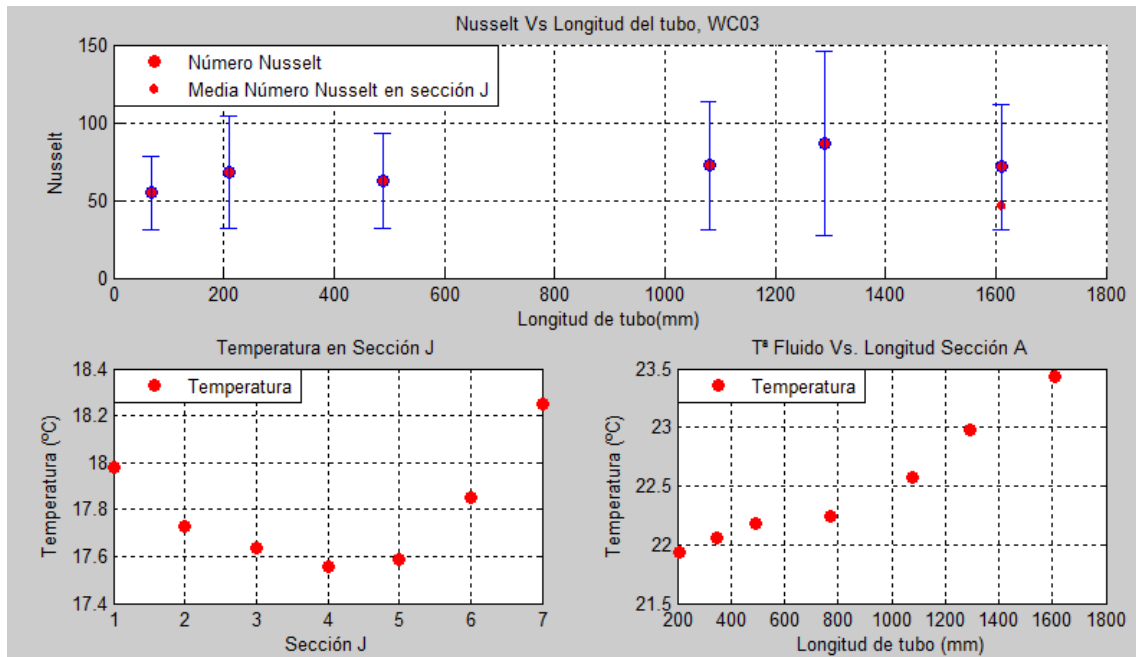


Figura 174: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:96 kg/h P:800 w/m²:

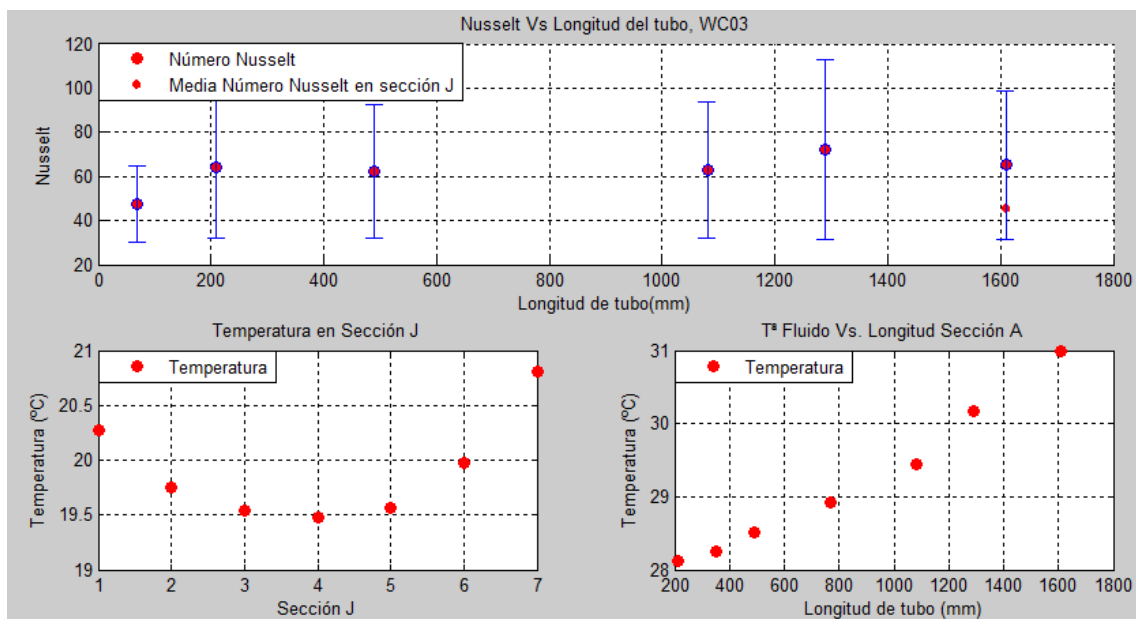


Figura 175: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



G:150 kg/h P:400 w/m²:

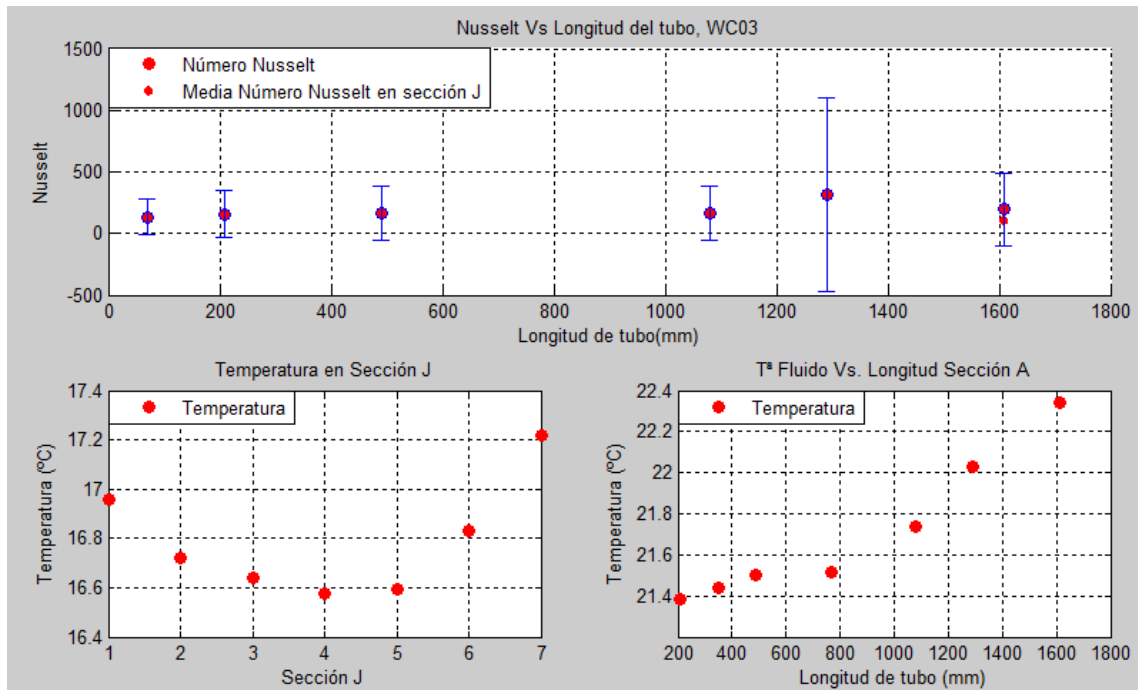


Figura 176: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.

G:150 kg/h P:800 w/m²:

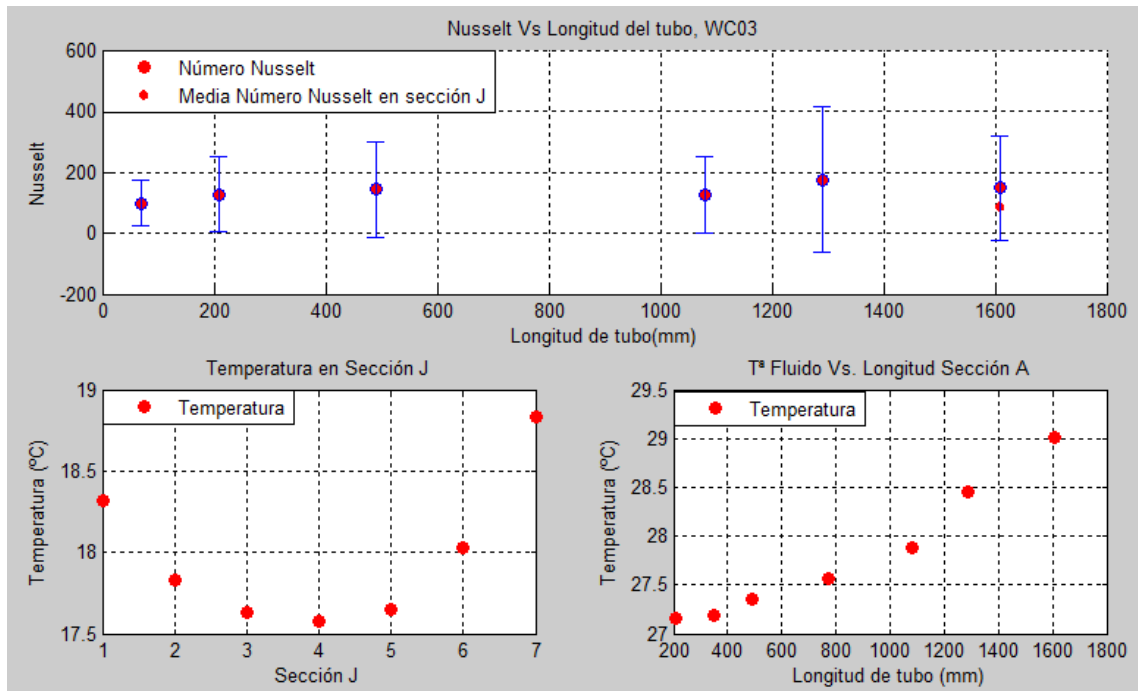


Figura 177: Tª de fluido a través del tubo. Temperatura en la sección J. Nusselt a lo largo del tubo.



ANÁLISIS DE RESULTADOS:

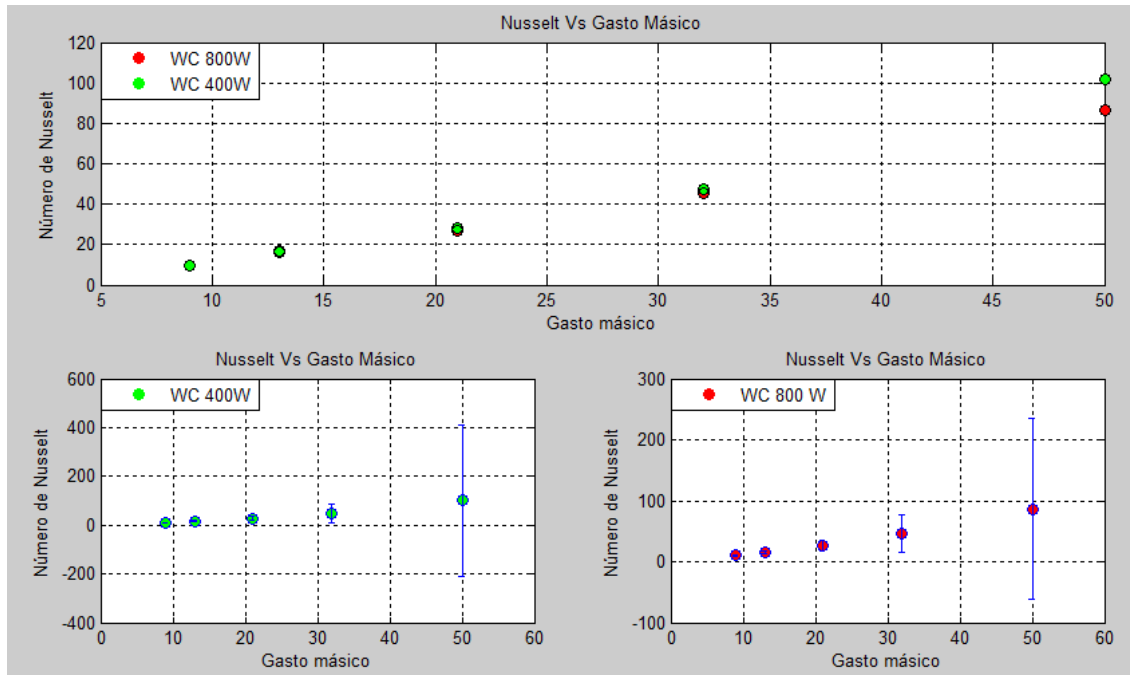


Figura 178: Nusselt Vs. Gasto Másico.

➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².

Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	9,268	9,637	10,320	11,523	11,474	10,563
41 kg/h		16,484	18,085	16,260	19,898	20,702	20,053
63 kg/h		27,645	36,442	33,397	38,351	42,229	37,541
96 kg/h		54,849	67,716	62,056	72,320	86,556	71,386
150 kg/h		136,462	158,077	165,993	168,590	324,103	199,079

Tabla 37: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 400 W/m².



➤ Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

Gasto	Longitud tubo	70	210	490	1080	1290	1610
27 kg/h	NUSSELT	9,280	9,845	10,262	11,686	11,720	11,073
41 kg/h		15,500	17,143	15,485	18,772	19,432	19,011
63 kg/h		25,485	34,263	32,333	35,864	38,333	35,469
96 kg/h		47,242	63,841	62,348	62,847	72,084	65,206
150 kg/h		98,377	126,796	142,758	126,737	175,108	147,919

Tabla 38: Nusselt Vs. Longitud del tubo a 800 W/m².

➤ Nusselt e incertidumbre de Nusselt.

Potencia	WC03 800W/m2		WC03 400W/m2	
Gasto Másico	Nu_HW	uNu_HW	Nu_LW	uNu_LW
27 kg/h	9,912	0,926	9,445	0,895
41 kg/h	16,037	2,473	16,658	2,794
63 kg/h	27,104	8,947	28,129	10,278
96 kg/h	45,390	30,707	47,097	38,584
150 kg/h	86,450	148,262	101,886	310,532

Tabla 39: Nusselt e incertidumbre de Nusselt.





ANEXO V: PROGRAMA UTILIZADO PARA EL PROCESADO DE DATOS.

ANEXO V: TUBO LISO.

➤ Cálculo del número de Nusselt para Tubo LISO.

[illegible]

```
%end

%%% Gráficas de evolución de temperatura:
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(datos(:,1),datos(:,48),'k-',datos(:,1),datos(:,49),'b-')
%Evolución de temperatura a la entrada y salida del captador 1 .
legend('Tª Entrada','Tª Salida','Location','NorthWest')
title('Temperatura de entrada y salida del captador')
xlabel('Número de ensayo')
ylabel('Temperatura (°C)')
%xlim([0 300])
%ylim([10 30])
grid on

subplot(2,1,2)
plot([tc1(:,34) tc1(:,35) tc1(:,36) tc1(:,37) tc1(:,38) tc1(:,39)])
%Evolución de temperatura en la sección J del captador 1.
%legend('Temperatura J1','Temperatura J2','Temperatura
J3','TemperaturaJ4','Temperatura J5','Temperatura J6','Temperatura J7')
title('Temperatura de la sección J')
xlabel('Número de ensayo')
ylabel('Temperatura (°C)')
%xlim([0 300])
%ylim([10 30])
grid on
pause

%%% Selección del intervalo a evaluar:
GG=input('Introduce intervalo a evaluar: ')
%Número inferior y superior de datos para promediar;entre corchetes.

%%% Media de cada una de las secciones:
a1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[1;3;5;10;11;16;17;22;23;28;33]),1);
e1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[9;15;21;27;32]),1);
b1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[6;12;18;22;29]),1);
d1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[8;14;20;26;31;34]),1);
g1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[34:40]),1);

%%% Cálculo de medias:
tel=mean(datos(GG(1):GG(2),48),1)+273.15; %Temperatura de entrada
captador 1.
tsl=mean(datos(GG(1):GG(2),49),1)+273.15; %Temperatura de salida
captador 1.
m1=mean(datos(GG(1):GG(2),51),1)/(3*3600); %Caudal másico captador
1. kg/s - se divide entre 3 tubos.
q1=mean(datos(GG(1):GG(2),53),1); %Calor aportado al
captador 1.

%%% Evaluación de la temperatura según propiedades del fluido:
teval1=[tel tsl];
tml=(tel+tsl)/2;
proptmcl=water(tml-273); %Propiedades del fluido
evaluadas a la temperatura media.
```



```
cp_tm1=proptmc1(4); %El vector water tiene la
forma: [densidad viscosidad conductividad calor].
rho_tm1=proptmc1(1);
mu_tm1=proptmc1(2);

%%% Temperatura Fluido = tfc
vector_es=[0 1855]; %Temperatura fluido a lo
largo del tubo.
t_es1=[te1 ts1];
fit_t1=polyfit(vector_es,t_es1,1);
tfc1=polyval(fit_t1,zzz);
tfc1_=polyval(fit_t1,zzz_); %Temperatura fluido
alrededor del tubo.

%%%>>>>Para qué es esto????
xt1=linspace(0,1855,100)
yt1=polyval(fit_t1,xt1); %Comprobación temperatura
de fluido.

%%% Temperatura Pared = tpc1
tpc1=d1; %Temperatura de pared del
tubo en sección D.
tpc1_=g1; %Temperatura de pared del
tubo en sección J.

%%% Temperatura media absorbedor captador 1 = tabsm1
fit_a1=polyfit(z,a1,4);
x1=linspace(0,z(end),100);
y1=polyval(fit_a1,x1);
tabsm1=mean(y1);

%%% Balance de energía: captador 1
qp1=0.836572593217653*tabsm1-19.645426782270015; %Calor de perdidas
(W)
qt1=q1; %Calor total U*I
qul=3*m1*cp_tm1*(ts1-te1); %Calor util
qt1_=qul+qp1; %Calor total=
calor de perdidas + calor util
eqt1=(qt1-qt1_)/qt1*100 %Error (%)
qt1m=qt1-qp1; %(qt1+qt1_)/2; %Calor total
promedio %%%OJO CON EL CALOR UTILIZADO.

%%% Número Nusselt.
Q1=qt1m/(3*At); %Flujo de calor
por tubo W/m2
tpc1=tpc1+273;
h1=Q1./(tpc1-tfc1);
for i=1:length(zzz) %Conductividad y
Nu para captador 1.
prop_zzz1(:,i)=water(tfc1(i)-273);
end
k_zzz1=prop_zzz1(3,:);
Nu1=(h1./k_zzz1)*D;
```



```
%%% Cálculo de Nusselt en la sección J:
tpc1=tpc1_+273; %Temperatura media
alrededor del tubo.
h1_=Q1./(tpc1_-tfc1_);
for i=1:length(zzz_) %Conductividad y Nu
para captador 1.
prop_zzz1_(:,i)=water(tfc1_(i)-273);
end
k_zzz1_=prop_zzz1_(3,:);
Nu1_=(h1_/k_zzz1_)*D;
Nu1_m=mean(Nu1_)

%%% Cálculo Incertidumbre de Nusselt:
B=(1/pi*L*k_zzz1);
I1=datos(:,52);
V1=datos(:,47);
u_V1=(0.04*V1)+(0.03*200);
u_I1=(0.03*I1);
u_tpc1=0.189 ; %Grados celsius
u_tfc1=0.0302; %Grados celsius
for i=1:6
u_Nu1(i,:)=(B(i).*sqrt((I1./(tpc1(i)-tfc1(i))).^2.*u_V1.^2+(V1./(tpc1(i)-
tfc1(i))).^2.*u_I1.^2+((-V1.*I1)./(tpc1(i)-
tfc1(i))).^2.*u_tpc1.^2+(V1.*I1)./(tpc1(i)-tfc1(i))).^2.*u_tfc1.^2)/100);
u_Nu1_m(i)=mean(u_Nu1(i,GG(1):GG(2)));
u_Nu1_(i)=Nu1(i)*u_Nu1_m(i);
end
u_Nu1media=mean(u_Nu1_);

%%% Reynolds Swirl:
Vax_c1=m1/(rho_tm1*Ac); %Velocidad axial.
Vt_c1=0; %Vt_c1=(pi/(2*y))*Vax_c1; %Velocidad
tangencial. Para este caso no hay velocidad tangencial.
Vsw_c1=sqrt(Vt_c1^2+Vax_c1^2); %Velocidad de swirl.
Resw1=(rho_tm1*d*Vsw_c1)/mu_tm1;

%%% Guardar datos conseguidos:
save datos 'tel' 'ts1' 'm1' 'q1' 'tpc1' 'tpc1_' 'tabsm1' 'qt1' 'qt1m'
'Nu1' 'Nu1_' 'Nu1_m' 'Resw1' 'u_Nu1_'
%save datos 'te2' 'ts2' 'm2' 'q2' 'tpc2' 'tpc2_' 'tabsm2' 'qt2'
'qt2m' 'Nu2' 'Nu2_' 'Nu2_m' 'Resw2' 'u_Nu1_'

%%% Gráficas:
figure(2)
subplot(2,1,1)
hold on
%plot(zzz,Nu1,'ro','markerfacecolor','r') %Gráfica de Nusselt a
lo
semilogy(zzz,Nu1,'ro','markerfacecolor','r')
axis([0 2000 1 1000])
errorbar(zzz,Nu1,u_Nu1_)
title('Nusselt Vs Longitud del tubo')
xlabel('Longitud de tubo(mm)')
ylabel('Nusselt')
xlim([0 1800])
%ylim([0 10])
```



```
hold on
plot(zzz_,Nul_m,'rx','linewidth',3) %Nusselt medio en la
sección J.
legend('Número Nusselt','Media Número Nusselt en sección
J','Location','NorthWest')
grid on

subplot(2,2,3) %Gráfica de la evolución
de la temperatura en la sección J.
CCC=[1 2 3 4 5 6 7]
JJJ=[g1(7) g1(5) g1(3) g1(1) g1(4) g1(6)]
plot(CCC,JJJ,'ro','markerfacecolor','r')
legend('Temperatura','Location','NorthWest')
title('Temperatura en Sección J')
xlabel('Sección J')
ylabel('Temperatura (°C)')
%xlim([0 8])
%ylim([30 50])
grid on

subplot(2,2,4) %Gráfica de la evolución
de la temperatura del fluido respecto de la longitud de tubo.
plot(z,a1,'ro','markerfacecolor','r');
hold on
plot(x1,y1,'k-');
legend('Tª Experimental','Tª Teórica','Location','NorthWest')
title('Tª Fluido Vs. Longitud Sección A') %Absorbedor 1ª línea.
xlabel('Longitud de tubo (mm)')
ylabel('Temperatura (°C)')
xlim([200 1800])
%ylim([30 50]) %Escala de y.
grid on
```

➤ Comparativa a diferentes potencias del número de Nusselt para Tubo LISO.

```
close all
clear all

pot=[400 800];
gasto=[50 32 21 13 9];

%%% Info para leyenda:
p='LISO'; % Cambiar tipo de lámina.

k=0;
m=0;
for j=1:length(gasto)
    for i=1:length(pot)
        %Nombre de carpeta
        folder_name=sprintf('LISO_Q%dW%d',gasto(j),pot(i));
        %main=pwd;
        ruta=strcat(pwd,'\ ',folder_name,'\Agua');
        data=load(strcat(ruta,'\datos.mat'));
        if i==1
            k=k+1;
```



```
Nu_LW(k)=data.Nu1_m;
Resw_LW(k)=data.Resw1;
uNu_LW(k)=mean(data.u_Nu1_);
clear data
else
    m=m+1;
    Nu_HW(m)=data.Nu1_m;
    Resw_HW(m)=data.Resw1;
    uNu_HW(m)=mean(data.u_Nu1_);
    clear data
end

end

end

%%% Gráfica de gasto másico frente a Nusselt:
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(gasto,Nu_HW,'ro','markerfacecolor','r')
hold on
plot(gasto,Nu_LW,'go','markerfacecolor','g')
title('Nusselt Vs Gasto Másico')
legend('LISO 800W','LISO 400W','Location','NorthWest');
xlabel('Gasto másico')
ylabel('Número de Nusselt');
loglog(gasto,Nu_HW,'ko')
hold on
loglog(gasto,Nu_LW,'ko')
grid on

%%% Gráfica de Reynolds Swirl frente a Nusselt:
subplot(2,1,2)
plot(Resw_HW,Nu_HW,'ro','markerfacecolor','r')
hold on
plot(Resw_LW,Nu_LW,'go','markerfacecolor','g');
title('Nusselt Vs Re_sw');
legend('LISO 800W','LISO 400W','Location','NorthWest');
xlabel('Número de Re_{sw}');
ylabel('Número de Nusselt');
loglog(Resw_HW,Nu_HW,'ko')
hold on
loglog(Resw_LW,Nu_LW,'ko')
grid on

%%% Gráfica de gasto másico frente a Nusselt:
figure(2)
subplot(2,2,1)
plot(gasto,Nu_HW,'ro','markerfacecolor','r')
hold on
loglog(gasto,Nu_HW,'ko')
hold on
errorbar(gasto,Nu_HW,uNu_HW,'bo')
title('Nusselt Vs Gasto Másico')
legend('LISO 800W','Location','NorthWest');
xlabel('Gasto másico')
ylabel('Número de Nusselt');
hold on
%errorbar(gasto,Nu_HW,sNu_HW)
grid on
```



```
%figure(3)
subplot(2,2,3)
plot(gasto,Nu_LW,'go','markerfacecolor','g')
hold on
loglog(gasto,Nu_LW,'ko')
hold on
errorbar(gasto,Nu_LW,uNu_LW,'bo')
title('Nusselt Vs Gasto Másico')
legend('LISO 400W','Location','NorthWest');
xlabel('Gasto másico')
ylabel('Número de Nusselt');
hold on
%errorbar(gasto,Nu_LW,sNu_LW)
grid on

%%% Gráfica de Reynolds Swirl frente a Nusselt:
%figure(4)
subplot(2,2,2)
plot(Resw_HW,Nu_HW,'ro','markerfacecolor','r')
hold on
loglog(Resw_HW,Nu_HW,'ko')
hold on
errorbar(Resw_HW,Nu_HW,uNu_HW,'bo')
title('Nusselt Vs Re_sw')
legend('LISO 800W','Location','NorthWest');
xlabel('Número de Re_{sw}')
ylabel('Número de Nusselt');
hold on
%errorbar(Resw_HW,Nu_HW,sNu_HW)
grid on

%figure(5)
subplot(2,2,4)
plot(Resw_LW,Nu_LW,'go','markerfacecolor','g')
hold on
loglog(Resw_LW,Nu_LW,'ko')
hold on
errorbar(Resw_LW,Nu_LW,uNu_HW,'bo')
title('Nusselt Vs Re_sw')
legend('LISO 400W','Location','NorthWest');
xlabel('Número de Re_{sw}')
ylabel('Número de Nusselt');
hold on
loglog(Resw_LW,Nu_LW,'ko')
grid on
```



ANEXO IV: LÁMINAS TT.

➤ Cálculo del número de Nusselt para Láminas TT.

[illegible]


```
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(datos(:,1),datos(:,48),'k-',datos(:,1),datos(:,49),'b-')
%Evolución de temperatura a la entrada y salida del captador 1 .
legend('Tª Entrada','Tª Salida','Location','NorthWest')
title('Temperatura de entrada y salida del captador')
xlabel('Número de ensayo')
ylabel('Temperatura (°C)')
%xlim([0 300])
%ylim([10 30])
grid on

subplot(2,1,2)
plot([tc1(:,34) tc1(:,35) tc1(:,36) tc1(:,37) tc1(:,38) tc1(:,39)])
%Evolución de temperatura en la sección J del captador 1.
%legend('Temperatura J1','Temperatura J2','Temperatura
J3','TemperaturaJ4','Temperatura J5','Temperatura J6','Temperatura J7')
title('Temperatura de la sección J')
xlabel('Número de ensayo')
ylabel('Temperatura (°C)')
%xlim([0 300])
%ylim([10 30])
grid on
pause

%%% Selección del intervalo a evaluar:
GG=input('Introduce intervalo a evaluar: ')
%Número inferior y superior de datos para promediar;entre corchetes.

%%% Media de cada una de las secciones:
a1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[1;3;5;10;11;16;17;22;23;28;33]),1);
e1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[9;15;21;27;32]),1);
b1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[6;12;18;22;29]),1);
d1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[8;14;20;26;31;34]),1);
g1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[34;40]),1);

%%% Cálculo de medias:
tel=mean(datos(GG(1):GG(2),48),1)+273.15; %Temperatura de entrada
captador 1.
ts1=mean(datos(GG(1):GG(2),49),1)+273.15; %Temperatura de salida
captador 1.
m1=mean(datos(GG(1):GG(2),51),1)/(3*3600); %Caudal másico captador
1. kg/s - se divide entre 3 tubos.
q1=mean(datos(GG(1):GG(2),53),1); %Calor aportado al
captador 1.

%%% Evaluación de la temperatura según propiedades del fluido:
teval1=[tel ts1];
tml=(tel+ts1)/2;
proptmcl=water(tml-273); %Propiedades del fluido
evaluadas a la temperatura media.
cp_tm1=proptmcl(4); %El vector water tiene la
forma: [densidad viscosidad conductividad calor].
rho_tm1=proptmcl(1);
mu_tm1=proptmcl(2);
```



```

%%% Temperatura Fluido = tfc
vector_es=[0 1855];
largo_del_tubo.
t_es1=[te1 ts1];
fit_t1=polyfit(vector_es,t_es1,1);
tfc1=polyval(fit_t1,zzz);
tfc1=polyval(fit_t1,zzz_);
alrededor del tubo.

%%%>>>Para qué es esto???
xt1=linspace(0,1855,100)
yt1=polyval(fit_t1,xt1);
de fluido.

%%% Temperatura Pared = tpc1
tpc1=d1;
tubo en sección D.
tpc1=g1;
tubo en sección J.

%%% Temperatura media absorbedor captador 1 = tabsml
fit_a1=polyfit(z,a1,4);
x1=linspace(0,z(end),100);
y1=polyval(fit_a1,x1);
tabsml=mean(y1);

%%% Balance de energía: captador 1
qp1=0.836572593217653*tabsml-19.645426782270015;
(W)
qt1=q1;
qu1=3*m1*cp_tm1*(ts1-te1);
qt1_=qu1+qp1;
calor de perdidas + calor util
eqt1=(qt1-qt1_)/qt1*100
qt1m=qt1-qp1; %(qt1+qt1_)/2;
promedio %%%OJO CON EL CALOR UTILIZADO.

%%% Número Nusselt.
Q1=qt1m/(3*At);
por tubo W/m2
tpc1=tpc1+273;
h1=Q1./(tpc1-tfc1);
for i=1:length(zzz)
Nu para captador 1.
prop_zzz1(:,i)=water(tfc1(i)-273);
end
k_zzz1=prop_zzz1(3,:);
Nu1=(h1./k_zzz1)*D;

%%% Cálculo de Nusselt en la sección J:
tpc1_=tpc1+273;
alrededor del tubo.

```



```
h1_=Q1./(tpc1_-tfc1_);
for i=1:length(zzz_)
    para captador 1. %Conductividad y Nu
    prop_zzz1_(:,i)=water(tfc1_(i)-273);
end
k_zzz1_=prop_zzz1_(3,:);
Nu1_=(h1_/k_zzz1_)*D;
Nu1_m=mean(Nu1_)

%%% Cálculo Incertidumbre de Nusselt:
B=(1/pi*L*k_zzz1_);
I1=datos(:,52);
%P1=datos(:,53);
V1=datos(:,47);
u_V1=(0.04*V1)+(0.03*200);
u_I1=(0.03*I1);
u_tpc1=0.189 ; %Grados celsius
u_tfc1=0.0302; %Grados celsius
%I1_m=mean(datos(GG(1):GG(2),52),1);
%V1_m=mean(datos(GG(1):GG(2),47),1);
%P1_m=mean(datos(GG(1):GG(2),53),1);
for i=1:6
    %u_Nu1(i,:)=B(i)*sqrt((((I1./(tpc1(i)-tfc1(i))
    )).^2).*(u_V1.^2))+(((V1./(tpc1(i)-tfc1(i))).^2).*(u_I1.^2))+(((V1.*I1)./(tpc1(i)-tfc1(i))).^2).*(u_tpc1.^2))+(((V1.*I1)./(tpc1(i)-tfc1(i))).^2).*(u_tfc1.^2));
    u_Nu1(i,:)=B(i).*sqrt((I1./(tpc1(i)-tfc1(i))).^2.*u_V1.^2+(V1./(tpc1(i)-tfc1(i))).^2.*u_I1.^2+((-V1.*I1)./(tpc1(i)-tfc1(i))).^2.*u_tpc1.^2+(V1.*I1)./(tpc1(i)-tfc1(i))).^2.*u_tfc1.^2)/100);
    u_Nu1_m(i)=mean(u_Nu1(i,GG(1):GG(2)));
    u_Nu1_(i)=Nu1(i)*u_Nu1_m(i);
end
u_Nu1media=mean(u_Nu1_);

%%% Reynolds Swirl:
Vax_c1=m1/(rho_tm1*Ac); %Velocidad axial.
Vt_c1=0; %Vt_c1=(pi/(2*y))*Vax_c1; %Velocidad tangencial. Para este caso no hay velocidad tangencial.
Vsw_c1=sqrt(Vt_c1^2+Vax_c1^2); %Velocidad de swirl.
Resw1=(rho_tm1*d*Vsw_c1)/mu_tm1;

%%% Guardar datos conseguidos:
save datos 'tel' 'ts1' 'm1' 'q1' 'tpc1' 'tpc1_' 'tabsm1' 'qt1' 'qt1m'
'Nu1' 'Nu1_' 'Nu1_m' 'Resw1' 'u_Nu1_'
%save datos 'te2' 'ts2' 'm2' 'q2' 'tpc2' 'tpc2_' 'tabsm2' 'qt2' 'qt2m'
'Nu2' 'Nu2_' 'Nu2_m' 'Resw2' 'u_Nu2_'

%%% Gráficas:
figure(2)
subplot(2,1,1)
hold on
plot(zzz,Nu1,'ro','markerfacecolor','r') %Gráfica de Nusselt a lo largo del tubo:
title('Nusselt Vs Longitud del tubo')
xlabel('Longitud de tubo (mm)')
ylabel('Nusselt')
xlim([0 1800])
```



```
%ylim([0 10])
hold on
plot(zzz_,Nu1_m,'rx','linewidth',3) %Nusselt medio en la
sección J.
legend('Número Nusselt','Media Número Nusselt en sección
J','Location','NorthWest')
errorbar(zzz,Nu1,u_Nu1_,'bo')
grid on

subplot(2,2,3) %Gráfica de la evolución
de la temperatura en la sección J.
CCC=[1 2 3 4 5 6 7]
JJJ=[g1(7) g1(5) g1(3) g1(1) g1(2) g1(4) g1(6)]
plot(CCC,JJJ,'ro','markerfacecolor','r')
legend('Temperatura','Location','NorthWest')
title('Temperatura en Sección J')
xlabel('Sección J')
ylabel('Temperatura (°C)')
%xlim([0 8])
%ylim([30 50])
grid on

subplot(2,2,4) %Gráfica de la evolución
de la temperatura del fluido respecto de la longitud de tubo.
plot(z,a1,'ro','markerfacecolor','r');
legend('Temperatura','Location','NorthWest')
title('Tª Fluido Vs. Longitud Sección A') %Absorbedor 1ª línea.
xlabel('Longitud de tubo (mm)')
ylabel('Temperatura (°C)')
xlim([200 1800])
%ylim([30 50]) %Escala de y.
grid on

%subplot(2,2,2) %Gráfica de la evolución
de la temperatura del fluido respecto de la longitud de tubo en sección D.
%plot(xtl,ytl,'k-');
%hold on
%plot(zzz,tfcl,'ro');
%title('Tª Fluido Vs. Longitud Sección D')
%xlabel('Longitud de tubo (mm)')
%ylabel('Temperatura (°C)')
%xlim([0 1800])
%ylim([30 50])
%grid on
```

➤ Comparativa a diferentes potencias del número de Nusselt para Láminas TT.

```
close all
clear all

pot=[400 800];
gasto=[50 32 21 13 9];

%%% Info para leyenda:
p='TT 42'; % Cambiar tipo de lámina.
```



```
k=0;
m=0;
for j=1:length(gasto)
    for i=1:length(pot)
        %Nombre de carpeta
        folder_name=sprintf('TT_Q%dW%d',gasto(j),pot(i));
        %main=pwd;
        ruta=strcat(pwd,'\ ',folder_name,'\Agua');
        data=load(strcat(ruta,'\datos.mat'));
        if i==1
            k=k+1;
            Nu_LW(k)=data.Nu1_m;
            Resw_LW(k)=data.Resw1;
            uNu_LW(k)=mean(data.u_Nu1_);
            clear data
        else
            m=m+1;
            Nu_HW(m)=data.Nu1_m;
            Resw_HW(m)=data.Resw1;
            uNu_HW(m)=mean(data.u_Nu1_);
            clear data
        end
    end
end
end
```

```
%%% Gráfica de gasto másico frente a Nusselt:
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(gasto,Nu_HW,'ro','markerfacecolor','r')
hold on
plot(gasto,Nu_LW,'go','markerfacecolor','g')
title('Nusselt Vs Gasto Másico')
legend('TT 42 800W','TT 42 400W','Location','NorthWest');
xlabel('Gasto másico')
ylabel('Número de Nusselt');
loglog(gasto,Nu_HW,'ko')
hold on
loglog(gasto,Nu_LW,'ko')
grid on
```

```
%%% Gráfica de Reynolds Swirl frente a Nusselt:
subplot(2,1,2)
plot(Resw_HW,Nu_HW,'ro','markerfacecolor','r')
hold on
plot(Resw_LW,Nu_LW,'go','markerfacecolor','g');
title('Nusselt Vs Re_sw');
legend('TT 42 800W','TT 42 400W','Location','NorthWest');
xlabel('Número de Re_{sw}');
ylabel('Número de Nusselt');
loglog(Resw_HW,Nu_HW,'ko')
hold on
loglog(Resw_LW,Nu_LW,'ko')
grid on
```

```
%%% Gráfica de gasto másico frente a Nusselt:
figure(2)
subplot(2,2,1)
```



```
plot(gasto,Nu_HW,'ro','markerfacecolor','r')
hold on
loglog(gasto,Nu_HW,'ko')
hold on
errorbar(gasto,Nu_HW,uNu_HW,'bo')
title('Nusselt Vs Gasto Másico')
legend('TT 42 800W','Location','NorthWest');
xlabel('Gasto másico')
ylabel('Número de Nusselt');
grid on

%figure(3)
subplot(2,2,3)
plot(gasto,Nu_LW,'go','markerfacecolor','g')
hold on
loglog(gasto,Nu_LW,'ko')
hold on
errorbar(gasto,Nu_LW,uNu_LW,'bo')
title('Nusselt Vs Gasto Másico')
legend('TT 42 400W','Location','NorthWest');
xlabel('Gasto másico')
ylabel('Número de Nusselt');
grid on

%%% Gráfica de Reynolds Swirl frente a Nusselt:
%figure(4)
subplot(2,2,2)
plot(Resw_HW,Nu_HW,'ro','markerfacecolor','r')
hold on
loglog(Resw_HW,Nu_HW,'ko')
hold on
errorbar(Resw_HW,Nu_HW,uNu_HW,'bo')
title('Nusselt Vs Re_sw')
legend('TT 42 800W','Location','NorthWest');
xlabel('Número de Re_{sw}')
ylabel('Número de Nusselt');
grid on

%figure(5)
subplot(2,2,4)
plot(Resw_LW,Nu_LW,'go','markerfacecolor','g')
hold on
loglog(Resw_LW,Nu_LW,'ko')
hold on
errorbar(Resw_LW,Nu_LW,uNu_LW,'bo')
title('Nusselt Vs Re_sw')
legend('TT 42 400W','Location','NorthWest');
xlabel('Número de Re_{sw}')
ylabel('Número de Nusselt');
hold on
loglog(Resw_LW,Nu_LW,'ko')
grid on
```



ANEXO IV: MUELLE.

➤ Cálculo del número de Nusselt para MUELLE.

```
clear all
close all

%%% Datos iniciales del captador: MUELLE
D=7e-3;           %m
g=9.81;           %m/s
L=1.855;          %m
At=pi*D*L;        %m2 Area transversal del tubo.
Ap=0.335*1.85     %Superficie del absorbedor y superficie de la manta.

%%% Secciones a lo largo del tubo:
z=[14 35 70 140 210 350 490 770 1080 1290 1610]; %Absorbedor 1º linea.
zz=[70 210 490 1080 1290]; %Absorbedor 2º linea.
zzz=[70 210 490 1080 1290 1610]; %Tubo.
zzz_=[1610]; %Sección J.

%%% Importar datos:
[impc]=importdata('WC_Q50W800.csv');
datos=impc.data;
tc1=datos(:, [2:41]);

%%% Calibración de datos obtenidos:
calib1=load('calibracion_colector1.dat');
m_1=calib1(:,2);
b_1=calib1(:,3);
for i=1:size(tc1,2)
    tc1(:,i)=tc1(:,i)*m_1(i)+b_1(i);
end

%%% Gráficas de evolución de temperatura:
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(datos(:,1),datos(:,52),'k-',datos(:,1),datos(:,54),'b-')
%Evolución de temperatura a la entrada y salida del captador 1 .
legend('Tª Entrada','Tª Salida','Location','NorthWest')
title('Temperatura de entrada y salida del captador')
xlabel('Número de ensayo')
ylabel('Temperatura (°C)')
%xlim([0 300])
%ylim([10 30])
grid on

subplot(2,1,2)
plot([tc1(:,34) tc1(:,35) tc1(:,36) tc1(:,37) tc1(:,38) tc1(:,39)
tc1(:,40)]) %Evolución de temperatura en la sección J del captador 1.
%legend('Temperatura J1','Temperatura J2','Temperatura J3','Temperatura
J4','Temperatura J5','Temperatura J6','Temperatura J7')
title('Temperatura de la sección J')
xlabel('Número de ensayo')
```



```
ylabel('Temperatura (°C)')
%xlim([0 300])
%ylim([10 30])
grid on
pause

%%% Selección del intervalo a evaluar:
GG=input('Introduce intervalo a evaluar:')
%Número inferior y superior de datos para promediar;entre corchetes.

%%% Media de cada una de las secciones:
a1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[1;3;5;10;11;16;17;22;23;28;33]),1);
e1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[9;15;21;27;32]),1);
b1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[6;12;18;22;29]),1);
d1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[8;14;20;26;31;34]),1);
g1=mean(tc1(GG(1):GG(2),[34;40]),1);

%%%%%%%%%SKINER%%%%%%%%%
%a1(8)=a1(8)+14;
%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%q=(datos(:,98));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%% Cálculo de medias:
tel=mean(datos(GG(1):GG(2),52),1)+273.15;           %Temperatura de entrada
captador 1.
ts1=mean(datos(GG(1):GG(2),54),1)+273.15;           %Temperatura de salida
captador 1.
ml=mean(datos(GG(1):GG(2),59),1)/(3*3600);          %Caudal másico captador
1. kg/s - se divide entre 3 tubos.
q1=mean(datos(GG(1):GG(2),61),1);                   %Calor aportado al
captador 1.

%%% Evaluación de la temperatura según propiedades del fluido:
teval1=[tel ts1];
tml=(tel+ts1)/2;
proptmcl=water(tml-273);                             %Propiedades del fluido
evaluadas a la temperatura media.
cp_tm1=proptmcl(4);                                   %El vector water tiene la
forma: [densidad viscosidad conductividad calor].

%%% Temperatura Fluido = tfc
vector_es=[0 1855];                                   %Temperatura fluido a lo
largo del tubo.
t_es1=[tel ts1];
fit_t1=polyfit(vector_es,t_es1,1);
tfc1=polyval(fit_t1,zzz);
tfc1=polyval(fit_t1,zzz_);                             %Temperatura fluido
alrededor del tubo.
```




```
%%%>>>>Para qué es esto????  
xt1=linspace(0,1855,100)  
yt1=polyval(fit_t1,xt1);  
de fluido. %Comprobación temperatura
```

```
%%% Temperatura Pared = tpc1  
tpc1=d1; %Temperatura de pared del  
tubo en sección D.  
tpc1_=g1; %Temperatura de pared del  
tubo en sección J.
```

```
%%% Temperatura media absorbedor captador 1 = tabsm1  
fit_a1=polyfit(z,a1,4);  
x1=linspace(0,1855,100);  
y1=polyval(fit_a1,x1);  
tabsm1=mean(y1);
```

```
%%% Balance de energía: captador 1  
qp1=0.836572593217653*tabsm1-19.645426782270015; %Calor de perdidas  
(W)  
qt1=q1; %Calor total U*I  
qu1=3*m1*cp_tm1*(ts1-te1); %Calor util  
qt1_=qu1+qp1; %Calor total=  
calor de perdidas + calor util  
eqt1=(qt1-qt1_)/qt1*100 %Error (%)  
qt1m=qt1-qp1; % (qt1+qt1_)/2;  
promedio %Calor total
```

```
%%% Número Nusselt.  
Q1=qt1m/(3*At); %Flujo de calor  
por tubo W/m2  
tpc1=tpc1+273;  
h1=Q1./(tpc1-tfc1);  
for i=1:length(zzz) %Conductividad y  
Nu para captador 1.  
prop_zzz1(:,i)=water(tfc1(i)-273);  
end  
k_zzz1=prop_zzz1(3,:);  
Nu1=(h1./k_zzz1)*D;
```

```
%%% Cálculo de Nusselt en la sección J:  
tpc1_=tpc1+273; %Temperatura media  
alrededor del tubo.  
h1_=Q1./(tpc1_-tfc1_);  
for i=1:length(zzz_) %Conductividad y  
Nu para captador 1.  
prop_zzz1_(:,i)=water(tfc1_(i)-273);  
end  
k_zzz1_=prop_zzz1_(3,:);  
Nu1_=(h1_/k_zzz1_)*D;  
Nu1_m=mean(Nu1_)
```

```
%%% Cálculo Incertidumbre de Nusselt:
```



```
B=(1/pi*L*k_zzz1);
I1=datos(:,59);
V1=datos(:,50);
u_V1=(0.04*V1)+(0.03*200);
u_I1=(0.03*I1);
u_tpc1=0.189 ; %Grados celsius
u_tfc1=0.0302; %Grados celsius
for i=1:6
u_Nul(i,:)=(B(i).*sqrt((I1./(tpc1(i)-tfc1(i))).^2.*u_V1.^2+(V1./(tpc1(i)-
tfc1(i))).^2.*u_I1.^2+((-V1.*I1)./(tpc1(i)-
tfc1(i))).^2.*u_tpc1.^2+(V1.*I1)./(tpc1(i)-tfc1(i))).^2.*u_tfc1.^2)/100);
u_Nul_m(i)=mean(u_Nul(i,GG(1):GG(2)));
u_Nul_(i)=Nul(i)*u_Nul_m(i);
end
u_Nulmedia=mean(u_Nul_);

%%%% Guardar datos conseguidos:
save datos 'tel' 'ts1' 'm1' 'q1' 'tpc1' 'tpc1_' 'tabsm1' 'qt1' 'qtlm'
'Nul' 'Nul_' 'Nul_m' 'u_Nul_'

%%%% Gráficas:
%%%% Gráfica de Nusselt a lo largo del tubo:
figure(2)
subplot(2,1,1)
hold on
plot(zzz,Nul,'ro','markerfacecolor','r')
hold on
title('Nusselt Vs Longitud del tubo, WC03')
xlabel('Longitud de tubo(mm)')
ylabel('Nusselt')
xlim([0 1800])
%ylim([0 10])
hold on
plot(zzz_,Nul_m,'rx','linewidth',3) %Nusselt medio en la
sección J.
legend('Número Nusselt','Media Número Nusselt en sección
J','Location','NorthWest')
errorbar(zzz,Nul,u_Nul_,'bo')
grid on

subplot(2,2,3) %Gráfica de la evolución
de la temperatura en la sección J.
CCC=[1 2 3 4 5 6 7]
JJJ=[g1(7) g1(5) g1(3) g1(1) g1(2) g1(4) g1(6)]
plot(CCC,JJJ,'ro','markerfacecolor','r')
legend('Temperatura','Location','NorthWest')
title('Temperatura en Sección J')
xlabel('Sección J')
ylabel('Temperatura (°C)')
%xlim([0 8])
%ylim([30 50])
grid on

subplot(2,2,4) %Gráfica de la evolución
de la temperatura del fluido respecto de la longitud de tubo.
plot(z,a1,'ro','markerfacecolor','r');
legend('Temperatura','Location','NorthWest')
title('Tª Fluido Vs. Longitud Sección A') %Absorbedor 1ª línea.
```



```
xlabel('Longitud de tubo (mm)')
ylabel('Temperatura (°C)')
xlim([200 1800])
ylim([30 50]) %Escala de y.
grid on
```

➤ Comparativa a diferentes potencias del número de Nusselt para MUELLE.

```
close all
clear all

pot=[400 800];
gasto=[50 32 21 13 9];

%%% Info para leyenda:
p='WC'; % Cambiar tipo de lámina.

k=0;
m=0;
for j=1:length(gasto)
    for i=1:length(pot)
        %Nombre de carpeta
        folder_name=sprintf('WC_Q%dW%d',gasto(j),pot(i));
        %main=pwd;
        ruta=strcat(pwd, '\', folder_name, '\Agua');
        data=load(strcat(ruta, '\datos.mat'));
        if i==1
            k=k+1;
            Nu_LW(k)=data.Nu1_m;
            uNu_LW(k)=mean(data.u_Nu1_);
            clear data
        else
            m=m+1;
            Nu_HW(m)=data.Nu1_m;
            uNu_HW(m)=mean(data.u_Nu1_);
            clear data
        end
    end
end

%%% Gráfica de gasto másico frente a Nusselt:
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(gasto,Nu_HW,'ro','markerfacecolor','r')
hold on
plot(gasto,Nu_LW,'go','markerfacecolor','g')
title('Nusselt Vs Gasto Másico')
legend('WC 800W','WC 400W','Location','NorthWest');
xlabel('Gasto másico')
ylabel('Número de Nusselt');
loglog(gasto,Nu_HW,'ko')
hold on
loglog(gasto,Nu_LW,'ko')
```



```
grid on

%%% Gráfica de gasto másico frente a Nusselt:

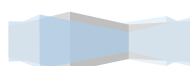
subplot(2,2,4)
plot(gasto,Nu_HW,'ro','markerfacecolor','r')
hold on
loglog(gasto,Nu_HW,'ko')
title('Nusselt Vs Gasto Másico')
legend('WC 800 W','Location','NorthWest');
xlabel('Gasto másico')
ylabel('Número de Nusselt');
hold on
errorbar(gasto,Nu_HW,uNu_HW,'bo')
grid on

%figure(3)
subplot(2,2,3)
plot(gasto,Nu_LW,'go','markerfacecolor','g')
hold on
loglog(gasto,Nu_LW,'ko')
title('Nusselt Vs Gasto Másico')
legend('WC 400W','Location','NorthWest');
xlabel('Gasto másico')
ylabel('Número de Nusselt');
hold on
errorbar(gasto,Nu_LW,uNu_LW,'bo')
grid on
```

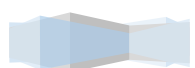


BIBLIOGRAFIA

- [1] Agbo, S. N and Okoroigwe, C. 2007. Analysis of thermal losses in the flat-plate collector of a Thermosyphon Solar water Heater. *Research Journal of Physics*. 1(1): 35-41.
- [2] Alonso Pérez, C. (2013). *Estudio experimental del comportamiento termohidráulico en tubos de colectores solares planos con elementos insertados*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Cartagena.
- [3] Arman, B. y Rabas, T.J. (1992). *Disruption Shape Effect on the Performance of Enhanced Tubes with the Separation and Reattachment Mechanism*. New York: ASME
- [4] Bejan, A. (1995). *Entropy Generation Minimization*. CTC Press, Boca Raton.
- [5] Bergles, A.E. (1997). Heat transfer enhancement. The encouragement and accommodation of high heat fluxes. *Journal of Heat Transfer*, 119, 8–19.
- [6] Bergles, A.E (2002). ExHFT for fourth generation heat transfer technology. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26, 335–344.
- [7] Bories, M. y Patureaux, T. (2005). Preheat Train Crude Distillation Fouling Propensity Evaluation by the Ebert and Panchal Model, en: Proceedings of the 2003 ECI Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications *Berkeley Electronic Press*.
- [8] CENER. (2008). *Cálculo de la función lineal de rendimiento para el captador. SOLARIS CP1 de Solaris Energía Solar S.A.*
- [9] Chandrasekar, M., Suresh, S. y Bose, A. Chandra (2010). Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of Al_2O_3 /water nanofluid in a circular pipe under laminar flow with wire coil inserts. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34, pp. 122–130.
- [10] Dewan, A., Mahanta, P., Raju, K. Sumithra y Kumar, P. Suresh (2004). Review of Passive Heat Transfer Augmentation Techniques. *Proceedings INSTN Mechanical Engrs*, 218.
- [11] Duffie, J. y Beckman, W. (1974). *Solar energy thermal processes*. John Wiley & Sons, Inc.
- [12] García, A. (2006). *Mejora de la transmisión de calor en tubos circulares lisos mediante muelles insertados*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena.
- [13] Frank Kreith, R. M. Manglik, Mark S. Bohn (1959). *Principios de Transferencia del calor*. Cengage Learning



- [14] Gunes, S., Ozceyhan, V. y Buyukalaca, O. (2010). The experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a tube with coiled wire insert placed separately from the tube wall. *Applied Thermal Engineering*, 30, pp. 1719–1725.
- [15] Hobbi, A. y Siddiqui, K. (2009). Experimental study on the effect of heat transfer enhancement devices in flat-plate solar collectors. *Heat and Mass Transfer*, 52, pp. 4650–4658.
- [16] Inaba, H., Ozaki, K. y Kanakoa, S. (1994). A Fundamental Study of Heat Transfer Enhancement and Flow-drag Reduction in Tubes by Means of Wire Coil Insert. *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 60, pp. 240–247.
- [17] Jaisankar, S., Radhakrishnan, T.K. y Sheeba, K.N. (2009). Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of forced. *Solar Energy*, 11, pp. 1943–1952.
- [18] Klaczak, A. (1994). Heat Transfer in Tubes With Spiral and Helical Turbulators. *Journal of Heat Transfer*, 95, pp. 557–559.
- [19] Kumar, P. y Judd, R.L. (1970). Heat Transfer With Coiled Wire Turbulence Promoters. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 48, pp. 378–383.
- [20] Lammardo, A. y Baritto, B. (2010). Modelo matemático del comportamiento térmico de un colector solar de placas planas inclinadas para calentamiento de aire. *Revista Ingeniería UC*, 17(3), 19–27.
- [21] Lankinen, R. y Sarkomaa, P. (1999). Heat Transfer and Fluid Flow of a Glycolbased Heat Transfer Liquid in a Smooth Tube and in a Tube with Wire Coil Insert. *International Energy and Environment Symposium*, pp. 487–491.
- [22] Liu, B.Y., Jordan, R.C. (1963). The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors. *Solar Energy*, 7, 53–70.
- [23] Muñoz-Esparza y Sanmiguel-Rojas, E. (2011). Numerical simulations of the laminar flow in pipes with wire coil insert. *Computers Fluids*, 44, pp. 169–177.
- [24] Nars, M.R. Jafari, Khalaj, A. Habibi y Mozaffari, S.H. (2009). Modeling of heat transfer enhancement by wire coil inserts using artificial neural network analysis. *Applied Thermal Engineering*, 30, pp. 143–151.
- [25] Oliver, D.R. y Shoji, Y. (1992). Heat Transfer Enhancement in Round Tubes Using Three Different Tube Inserts: non-Newtonian Liquids. *Trans IChemE*, 70, pp. 558–564.



- [26] Rabas, T.J. (1994). Prediction Methods for Single Phase Turbulent Flow Inside Tubes with Wire-Coil Inserts. *Optimal Design of Thermal Systems and Components*, pp.19–97.
- [27] Ravigururajan, T.S. y Bergles, A.E. (1996). Development and Verification of General Correlations for Pressure Drop and Heat Transfer in Single-Phase Turbulent Flow in Enhanced Tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 13, pp. 55–70.
- [28] Saeedinia, M., Akhavan-Behabadi, M.A. y Nasr, M. (2012). Experimental study on heat transfer and pressure drop of nanofluid flow in a horizontal coiled wire inserted tube under constant heat flux. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36, pp.158–168.
- [29] Sethumadhavan, R. y Rao, M. Raja (1983). Turbulent Flow Heat Transfer and Fluid Friction in Helical-Wire-Coil-Inserted Tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* , 26, pp. 1833–1845.
- [30] Shoji, Y., Sato, K. y Oliver, D.R. (2003). Heat Transfer Enhancement in Round Tube Using Wire Coil: Influence of Length and Segmentation. *Heat Transfer-Asian Research*, 32, pp. 99–107.
- [31] Silva, A., Kay, S.T., Liddle, A.R. y Thomas, P.A. (2001). The Impact of Cooling and Preheating on the Sunyaev-Zeldovich Effect. *The Astrophysical Journal*, 561, pp.15–18.
- [32] Survey, Market (2003). *The European Market for Heat Exchangers*. Frost and Sullivan.
- [33] Taylor, R.P., Coleman, H.W. y Hodge, B.K. (1989). Prediction of Heat Transfer in Turbulent Flow over Rough Surfaces. *Journal of Heat Transfer* , 111, pp. 568–572.
- [34] Uttarwar, S.B. y Rao, M. Raja (1985). Augmentation of Laminar Flow Heat Transfer in Tubes by Means of Wire Coil Inserts. *Transactions of the ASME*, 107, pp. 930–935.
- [35] Wang, L. y Sundén, B. (2002). Performance Comparison of Some Tube Inserts. *Communications of Heat and Mass Transfer* , 29, pp. 45–56.
- [36] Webb, R. L. y Kim, N. (2005). *Principles of Enhanced Heat Transfer*. Taylor and Francis, 2a edición.
- [37] Zhang, Y.F., li, F.Y. y Liang, Z.M. (1991). Heat Transfer in Spiral-Coil-Inserted Tubes and its Application. *ASME HTD 169*, pp. 31–36.

